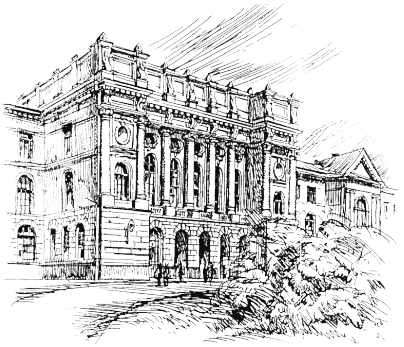
6–2(138)/2011



Научно-технические ведомости СПбГПУ

ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

Том 2

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Алферов Ж.И., академик РАН; *Васильев Ю.С.*, академик РАН (председатель);
Костюк В.В., академик РАН; *Лопота В.А.*, чл.-кор. РАН;
Окрепилов В.В., чл.-кор. РАН; *Рудской А.И.*, чл.-кор. РАН;
Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН; *Федоров М.П.*, чл.-кор. РАН;
Фортов В.Е., академик РАН.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., академик РАН (главный редактор); *Арсеньев Д.Г.*, д-р техн. наук, профессор;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор (зам. гл. редактора);
Боронин В.Н., д-р техн. наук, профессор; *Глухов В.В.*, д-р экон. наук, профессор;
Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор; *Иванов А.В.*, д-р техн. наук, профессор;
Иванов В.К., д-р физ.-мат. наук, профессор; *Козловский В.В.*, д-р физ.-мат. наук, профессор;
Рудской А.И., чл.-кор. РАН (зам. гл. редактора); *Юсупов Р.М.*, чл.-кор. РАН.

СЕРИЯ “ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ”

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;
Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;
Заборовский В.С., д-р техн. наук, профессор;
Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;
Фотиади А.Э., д-р физ.-мат. наук, профессор;
Черноруцкий И.Г., д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор – зам. председателя;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор – зам. председателя;
Болдырев Ю.Я., д-р техн. наук, профессор;
Пышкина Г.А., технический секретарь;
Карпов Ю.Г., д-р техн. наук, профессор;
Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор;
Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор;
Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор;
Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор;
Шабров Н.Н., д-р техн. наук, профессор;
Клавдиев В.Е., канд. техн. наук, доцент.

Журнал выходит под научно-методическим руководством Российской академии наук с 1995 года.

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал издается в пяти сериях:
Наука и образование;
Физико-математические науки;
Экономические науки;
Информатика, телекоммуникации, управление;
Гуманитарные и общественные науки.

Журнал зарегистрирован в Госкомпечати РФ. Свидетельство № 013165 от 23.12.94.

Подписной индекс **18390** в каталоге “Газеты. Журналы” Агентства “Роспечать”.

Журнал включен в базу данных “Российский индекс научного цитирования” (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки на сайте http://www.elibraru.ru.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции серии (812) 552-62-16.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011

Содержание

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Федосов Д.В. *Методика выбора варианта подсистемы связи в системах транспортного мониторинга* 7

Давыдов А.Е. *Апостериорно-вероятностный метод прогнозирования трафика в сетях с коммутацией пакетов* 13

Проблемы передачи и обработки информации

Макаров С.Б., Рашич А.В. *Формирование и прием спектрально-эффективных сигналов с OFDM* 19

Шишкалов А.В., Медведев В.М. *Особенности проявления структурно-статистических признаков речевых сигналов при низкоскоростном кодировании* 26

Константинов Ю.А., Крюков И.И., Поскребышев М.М., Харламова Н.А. *Автоматизированный сбор данных при исследовании характеристик волоконных световодов на этапах производства* 30

Бендерская Е.Н., Никитин К.В. *Моделирование нейронной активности мозга и биоинспирированные вычисления* 34

Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства

Романов Р.И., Коротков А.С. *Повышение помехоустойчивости статической запоминающей ячейки с пониженной потребляемой мощностью* 41

Ильюшин Ю.В. *Методика расчета оптимального количества нагревательных элементов в зависимости от значений температурного поля* 48

Системный анализ и управление

Власов А.В., Кузнецова Э.М., Николаенко Ю.В. *Статические и динамические характеристики электрогидравлического клапана и волнового насоса с магнитожидкостным сенсором* 53

Вычислительные машины и программное обеспечение

Григоров А.С. *Подход к разработке картотечных информационных систем, основанный на предметно-ориентированной модели метаданных* 59

Васильев А.Е., Донцова А.В., Мурго А.И. *Алгоритмическая реализация средств нечеткой обработки информации для встраиваемых интеллектуальных систем микроконтроллерного управления* 63

Зиновьев И.И., Шамин П.Ю. *Обнаружение лиц людей в системах видеонаблюдения* 70

Брык И.Ю., Кетов Д.В., Купреенко С.В. *Динамический контроль целостности программ и процессов межсетевых экранов* 75

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Мещеряков С.В., Иванов В.М., Бортяков Д.Е. *Система автоматизированного учета технического состояния грузоподъемного оборудования* 81

Захаревич Н.В., Иванов Д.И., Цикин И.А. *Визуализация результатов моделирования процессов газофазного синтеза наноразмерных структур при сетевом доступе к кластерному вычислителю* 88

Мещеряков С.В., Иванов В.М., Бортяков Д.Е. *Анализ эксплуатационных дефектов грузоподъемного оборудования в системе автоматизированного проектирования* 95

Болдырев Ю.Я., Замотин К.Ю., Петухов Е.П. *Моделирование процесса роста нанопленок методом химического осаждения из газовой фазы* 102

Арсеньев Д.Г., Иванов В.М., Берковский Н.А. *Эффективный выбор плотности распределения случайной сетки при решении задачи о слежении по азимуту методом Монте-Карло* 109

Ильясов Б.Г., Дегтярева И.В., Макарова Е.А., Карташева Т.А. *Интеллектуальные алгоритмы принятия решений при управлении инвестиционным процессом макроэкономической системы* 116

Антышев Е.П., Тименков Ю.В. *Моделирование распределения вычислительных ресурсов с учетом влияния буферизации кода* 123

Васильева Т.П., Мызникова Б.И., Русаков С.В. *О возможности моделирования процесса градообразования с помощью клеточных автоматов* 128

Козелецкая Т.А., Герман Е.А., Дмитриев А.Г. *Математическая модель кардиналистской полезности* 134

Жуков К.Г. *Алгоритм реализации параллельных вычислений по формулам численного интегрирования Рунге–Кутта* 143

Козлов В.Н., Хлопин С.В. *Разностные схемы для синтеза управления нелинейными теплопроводящими объектами* 149

Управление в социальных и экономических системах

Медведев А.В., Победаш П.Н. *Применение операционного подхода к анализу экономических систем* 155

Пархоменко В.А., Швецов К.В. *Автоматизация оценки активных элементов социотехнических систем* 158

Иванов М.В., Матвеев А.В. *Критерий эффективности управления пожарным риском при использовании средств аварийной эвакуации* 165

Ходырев И.А., Попова С.В. *Сравнение алгоритмов process mining для задачи поиска моделей процессов* 170

Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

Ветринский Ю.А. *Концепция интеллектуальной системы контроля результатов обучения на базе штатной LMS* 179

Юсупов Р.М. *Из истории развития информатики и информационных технологий в Санкт-Петербурге* 184

Сведения об авторах 191

Аннотации 195

Contents

Telecommunication systems and computer networks

Fedosov D.V. *Method of choice of telecommunication system variant for transport monitoring* 7

Davydov A.E. *A posteriori-probabilistic method of traffic forecasting in packet switching networks*..... 13

Information transfer and processing

Makarov S.B., Rashich A.V. *Generation and reception of spectrally efficient OFDM-signals*..... 19

Shishkalov A.V., Medvedev V.M. *Peculiar properties manifestation structure-statistical signs speech signals by slow-speed coding* 26

Konstantinov Yu.A., Kryukov I.I., Poskrebishev M.M., Harlamova N.A. *Automated data collection during the process of optical fibers performance investigation on their production stages* 30

Benderskaya E.N., Nikitin K.V. *Modelling neural activity of brain and bio-inspired computing* 34

Radio engineering, aerials, SHF-devices

Romanov R.I., Korotkov A.S. *Static noise margine improving of dual-selective sram cell* 41

Ilyushin Yu.V. *Method of calculating optimal number of heaters based on temperature field values* 48

System analysis and control

Vlasov A.V., Kuznetsova E.M., Nikolaenko Yu.V. *Static and dynamic characteristics electro-valve and pump wave patterns magneto sensor* 53

Computer systems and software

Grigorov A.S. *Filing information systems development approach based on domain-specific metadata model* 59

Vassiliev A.E., Dontsova A.V., Murgo A.I. *Fuzzy computations algorithms for MCU-based intelligent embedded control systems*..... 63

Zinoviev I.I., Shamin P.Yu. *Face detection in video surveillance systems* 70

Bryk I.Yu., Ketov D.V., Kupreenko S.V. Dynamic control of program and process integrity of network firewalls..... 75

Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

Mescheryakov S.V., Ivanov V.M., Bortyakov D.E. *Automated expertise system of lifting equipment operating conditions* 81

Zakharevich N.V., Ivanov D.I., Tsikin I.A. *The visualization of modeling nanostructures gas-phase syntheses in an evironment of network access to the computing cluster*..... 88

Mescheryakov S.V., Ivanov V.M., Bortyakov D.E. *Analysis of operating defects of lifting equipment in computer-aided design system* 95

Boldyrev Yu.Ya., Zamotin K.Yu., Petukhov E.P. *Modelling of chemical vapor deposition for growth of thin films* 102

Arseniev D.G., Ivanov V.M., Berkovskiy N.A. *Effective choice of P.D.F. in solving bearing-only problem by Monte Carlo method* 109

Ilyasov B.G., Degtyareva I.V., Makarova E.A., Kartasheva T.A. *Intelligent decision-making algorithms at macroeconomic system investment process management* 116

Antyshev E.P., Timenkov Yu.V. *Modelling of calculation resources distribution with allowance for instruction caching* 123

Vasilyeva T.P., Myznikova B.I., Rusakov S.V. *About possibility of urban development modelling by means of cellular automat* 128

Kozeletskaya T.A., Herman E.A., Dmitriev A.G. *Mathematical model of the cardinal utility* 134

Zhukov K.G. *Parallel computing algorithm on the base of Runge-Kutta numerical integration equations* .. 143

Kozlov V.N., Khlopin S.V. *Difference schemes for the synthesis of nonlinear management having thermally conductive objects* 149

Management in social and economic systems

Medvedev A.V., Pobedash P.N. *Application of operational approach to the analysis of economic systems* 155

Parhomenko V.A., Shvetsov K.V. *Automated assessment of the active elements of sociotechnical systems* 158

Ivanov M.V., Matveev A.V. *Criterion of efficiency of manage by fire risk with application of equipment of emergency evacuation* 165

Khodyrev I.A., Popova S.V. *Quantitative comparison of basic process mining algorithms* 170

Information and telecommunication technologies in education

Vetrinsky Yu.A. *The concept of intellectual knowledge monitoring system based on the regular LMS* 179

Yusupov R.M. *From the history of computer science and information technologies development in St. Petersburg* 184

About the authors 191

Abstracts 195

УДК 621.396.24

Д.В. Федосов

МЕТОДИКА ВЫБОРА ВАРИАНТА ПОДСИСТЕМЫ СВЯЗИ В СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТНОГО МОНИТОРИНГА

Создание спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС дало мощный импульс для развития телематического мониторинга на транспорте. Так, одним из направлений научного обеспечения формирования единого транспортного пространства России, обозначенного в Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г., утвержденной Распоряжением Правительства РФ № 1734-р от 22 ноября 2008 г., является «разработка навигационных систем и систем телематического мониторинга транспортных потоков, систем управления транспортными потоками и интеллектуальных транспортных систем».

Следуя работам [1, 2], рассмотрим основные положения, на которых базируется построение систем мониторинга транспорта.

Задачи контроля перевозок грузов и контроля пассажирских перевозок, включающие в себя подзадачи определения местоположения подвижного объекта и сравнительного анализа полученной информации с установленным графиком движения, контроля за техническим состоянием транспортного средства и условиями перевозки грузов, индикацию различных нештатных ситуаций, могут решаться водителем транспортного средства (экспедитором) или диспетчерами. В последнем случае решение этих задач требует передачи данных в службу сопровождения грузоперевозок или в транспортные агентства. Страховые компании также заинтересованы в получении информации о транспортных перевозках.

Знание точного местоположения подвижного объекта с грузом позволяет осуществить контроль его перемещений и использовать превентивные меры или меры быстрого реагирования в случае возникновения непредвиденных, в т. ч. чрезвычайных ситуаций. Системы мониторинга транспорта могут оказаться достаточно эффективными и при обеспечении безопасности перевозимых грузов. В случае несанкционированного вскрытия дверей транспортного средства, вагона, контейнера с грузом и т. п. может автоматически посылаться аварийный сигнал и данные о местонахождении подвижного объекта. Эти данные по каналам связи поступают в ближайшую службу обеспечения безопасности. Одновременно с сообщениями о местоположении транспортного средства могут передаваться данные о состоянии датчиков, контролирующих основные параметры перевозимого груза (например, температуру в контейнере или цистерне, уровень жидкости, количество топлива в баках и пр.). Кроме того, в ряде случаев необходим двусторонний обмен информацией между водителями транспортных средств и диспетчерами.

При рассмотрении задач перевозки грузов выделяют:

перевозку пассажиров и грузов различными видами транспорта;

перевозку грузов, не допускающих длительную задержку (скоропортящихся продуктов и др);

перевозку ценных грузов, банковские перевозки и др.;

перевозку нефтепродуктов и химически опасных грузов, способных в случае аварии нанести ущерб окружающей среде;

перевозку радиоактивных и других опасных грузов и материалов, способных в случае аварии вызвать угрозу жизни и здоровью людей.

Выделяют [1] несколько различных категорий сухопутных, морских и авиационных пользователей, которые с точки зрения оптимального обслуживания, можно отнести к разным сегментам рынка:

персональные пользователи;

дальние транспортные и грузовые перевозки, транспортировка контейнеров смешанными видами транспорта;

местное движение, включая связь и навигацию на дорогах и в пределах города;

обеспечение навигационными средствами индивидуального транспорта;

движение в сельских, удаленных, малонаселенных и лесных районах;

связь и навигация на железнодорожном транспорте, повышение интенсивности движения поездов без угрозы безопасности, контроль местонахождения вагонного парка;

непрерывное глобальное навигационное обеспечение гражданской авиации;

навигация и связь для малых судов, рыболовства, отдыха на воде;

обеспечение деятельности различных служб в чрезвычайных ситуациях (спасательные службы, службы скорой помощи, милиция, пожарные).

По величине среднесуточной информационной нагрузки всех пользователей системы контроля перемещения грузов (СКПГ) принято условно делить на четыре категории [2]:

1) малоактивные (предающие данные только в экстремальных ситуациях);

2) малоинформативные;

3) среднеинформативные;

4) высокоинформативные.

К первой категории относят сообщения от датчиков охранной сигнализации, установленных на транспортных средствах или других объектах, а также аварийные или экстренные сообщения. Объем одного сообщения от датчиков охранной сигнализации сравнительно невысок: 32–64 бита для радиомаяков и 100–200 бит для абонентских терминалов. Однако требования к задержке в обслуживании для этих источников информации достаточно жесткие – сообщения должны быть переданы практически немедленно. Такие датчики срабатывают лишь в экстремальных ситуациях, а в остальное время остаются пассивными. Поскольку датчики находятся большую часть времени в режиме молчания, то необходимо периодически контролировать их исправность.

Ко второй категории относят короткие сообщения от необслуживаемых датчиков, контролирующих состояние перевозимого груза или транспортного средства, а также данные о местоположении подвижного объекта. Система контроля должна обеспечивать передачу этих сообщений в автоматическом режиме периодически

Таблица 1

Прогноз по объемам передаваемой информации и допустимой задержке в обслуживании для разных категорий пользователей

Вид предоставляемых услуг	Объем передаваемых сообщений от абонента	Число обращений абонента	Допустимая задержка в обслуживании абонента, мин
Автоматизированный сбор данных с необслуживаемых датчиков (периодический или по запросу)	30–300 бит	1–3 раза в сутки	30–60
Передача аварийных сообщений: сообщение об аварии; контроль работоспособности	50–100 бит 100–200 бит	1–2 раза в год 0,05–0,5 раз в сутки	3–30 в течение суток
Речевая диспетчерская связь	12–24 Кбит*	1–3 раза в сутки	30–60
Обмен данными между водителем и диспетчером	0,5–1 Кбит	2–5 раз в сутки	30–60
Передача данных о местоположении грузов	100 –300 бит	1–3 раза в сутки	30
Обеспечение безопасности	32– 64 бита	1–2 раза в год	до 5
Угон транспортных средств	32–64 бита	До 10 раз в час (при угоне)	до 5

* Объем цифрового речевого сообщения указан для одной фразы, имеющей среднюю длительность 5 с при скорости передачи 2,4–4,8 Кбит/с

Таблица 2

Преимущества и недостатки двух видов обслуживания при сопровождении перевозок грузов

Вид услуг	Преимущества	Недостатки
Речь	Более удобна в общении, обеспечивает хорошее взаимопонимание в процессе телефонного разговора. Проще в обслуживании в нештатных ситуациях	Требуются диспетчеры для непрерывного круглосуточного обслуживания телефонных вызовов. Возможно использование радиотелефона для неслужебных разговоров. Неэффективное использование пропускной способности радиоканалов
Данные	Регистрация данных в сжатой форме с документальным подтверждением. Прием информации в отсутствие абонента. Возможность автоматизации обработки данных и выхода в сети передачи данных	Требует обучения абонентов работе с терминалом. Сложнее обработка данных в случае с нештатных ситуаций

или по запросу служб контроля за перемещеним транспортных средств и состоянием перевозимого груза. Объем одного сообщения обычно не превышает 300 бит. Опрос датчиков осуществляется с частотой от одного до трех раз в сутки. Для отдельных категорий пользователей возможна и более высокая частота опроса.

В третью категорию включаются пользователи, передающие текстовые сообщения, объем которых обычно не превышает 2 Кбит в сутки. Этот вид услуг предназначен для организации оперативной связи между транспортным средством и диспетчерами или службами контроля грузовых перевозок.

К категории высокоинформативных источников (объем передаваемых сообщений более 10 Кбит) относятся пользователи, пользующиеся услугами сетей передачи данных, факсимильной, телексной и речевой связи.

Проведенные исследования [3] показали, что частота обмена информацией между водителями международных перевозок и диспетчерами составляет от 1 до 2,5 раз в сутки при длине сообщения 200–300 бит. Необходимость передавать сообщения у водителей, которые сталкиваются с непредвиденными ситуациями (дорожные пробки, поломки, проблемы с таможней и т. п.), примерно в два раза выше, чем у диспетчеров. Режим передачи данных использовался чаще, чем обмен речевыми сообщениями, поскольку наличие в абонентской аппаратуре печатающего устройства позволяло получать документальные подтверждения указаний, получаемых от диспетчеров (табл. 1 и 2).

Использование спутниковых подсистем связи в системах транспортного мониторинга, рассмотренное в [1, 2], является не единственно возможным способом организации информационного обмена между транспортным средством и диспетчерским центром. В густонаселенных районах с развитой телекоммуникационной инфраструктурой в настоящее время при построении систем мониторинга широко используются сервисы, предоставляемые операторами систем сотовой связи. Для связи между такими районами – возможности систем передачи данных и компьютерных сетей.

В данной статье рассматриваются вопросы построения системы мониторинга для сегментов рынка, ориентированных на осуществление перевозок в районах с неразвитой инфраструктурой. К таким сегментам можно отнести:

дальние транспортные и грузовые перевозки, при осуществлении которых требуется возможность передачи сигнала тревоги в любой момент времени (или передача информации о положении и состоянии транспортного средства с интервалами порядка нескольких минут);

движение в сельских, удаленных, малонаселенных и лесных районах, находящихся вне зоны обслуживания сотовых систем связи;

непрерывное глобальное навигационное обеспечение гражданской авиации, в т. ч. при работе авиации в районах Крайнего Севера;

навигация и связь для малых судов, рыболовства, отдыха на воде;

обеспечение деятельности различных служб в чрезвычайных ситуациях.

Как было показано в [4, 5], телекоммуникационные системы, разрабатываемые для обеспечения работы систем мониторинга, ориентированных на данные сегменты рынка, могут строиться на основе систем декаметровой (ДКМ) радиосвязи. Данное направление развито в [6], где дополнительно рассмотрены возможности передачи сообщений в средневолновом (СВ) диапазоне.

Наличие альтернатив при решении задачи обмена информацией в мониторинговой системе требует разработки методик проведения сравнительного анализа различных вариантов построения подсистем радиосвязи.

Рассмотрим следующую задачу.

Предположим, что доставку сообщений от подвижных объектов мониторинга в ЦОД можно теоретически организовать с использованием пяти различных подсистем связи.

Организация работы первого канала связана с необходимостью развертывания уже разработанной и имеющейся на рынке радиотехнического оборудования системы связи (покупка и монтаж оборудования). Дальнейшая эксплуатация системы будет проводиться собственными силами компании.

Вторая система требует разработки и изготовления (модернизации существующего) оборудования, но будет обеспечивать бóльшую зону покрытия и более низкие затраты на развертывание системы. Эксплуатационные расходы будут соизмеримыми с расходами первого из рассмотренных случаев.

Третья система предполагает аренду радиоканалов существующего оператора связи и оплату его услуг в виде платы за трафик. Капитальные вложения в этом случае относительно невелики и определяются только покупкой терминального оборудования. Собственные эксплуатационные расходы при этом будут меньше, чем в предыдущих случаях.

Четвертая система предполагает аренду каналов проводной связи между базовыми станциями и развертывание систем радиосвязи, обслуживающих некоторую территорию вокруг базовых станций.

Пятая система аналогична по топологии третьей, но передача данных с объектов мониторинга в ЦОД осуществляется в низкоскоростном режиме в связи с низкой пропускной способностью канала. Система требует разработки и развертывания. При этом не требует оплаты трафика у сторонних операторов.

Суммарная стоимость развертывания и обслуживания каждой из систем на некоторый момент времени может быть рассчитана по формуле:

$$C(t,I,Z,N,\Delta t) = C_1 + C_2 N + C_3 N_{\text{БС}} + \\ + C_4 \sum_{j=1}^{N_{\text{БС}}} \left(f\left(I_j \big/ (N_{БС}\Delta t\, I_{\text{К}}) \right) \right) + \\ + C_5 f\left(t_{\text{ч}} \big/ \Delta t \right) I \Big|_{t>\tau} + C_6 t\big|_{t<\tau} + C_7 t\big|_{t>\tau}, \quad (1)$$

где t – время, мес.; τ – время разработки системы и ввода ее в эксплуатацию; $t_{\text{ч}}$ – время эксплуатации; Δt – период опроса; I_n – объем трафика, порождаемый каждым из объектов мониторинга, байт; I – общий объем трафика, передаваемый системой связи при одном опросе всех объектов, байт; I_j – объем трафика, обслуживаемого одной базовой станцией; $I_{\text{БС}j}$ – объем трафика j-й базовой станции, байт/ч; $I_{\text{К}}$ – пропускная способность одного канала связи, байт/ч; Z – площадь зоны обслуживания мониторинговой системы, км^2; N – количество объектов мониторинга, шт.; $N_{\text{БС}}$ – количество базовых станций в системе связи, шт.; C_1 – стоимость разработки проекта, у. е.; C_2 – стоимость разработки (покупки) оборудования для одного объекта мониторинга, у. е.; C_3 – стоимость создания и развертывания одной базовой станции, у. е.; C_4 – стоимость создания на базовой станции дополнительных каналов связи, у. е.; C_5 – стоимость трафика, у. е./Кбит; C_6 – стоимость обслуживания на этапе проектирования и монтажа системы, у. е./мес.; C_7 – стоимость обслуживания на этапе эксплуатации, у. е./мес.; $f(x)$ – функция округления до ближайшего большего или равного целого числа.

$$I = \sum_{n=1}^{N} (I_n + I_{\text{сл}}), \quad (2)$$

где $I_{\text{сл}}$ – дополнительная (служебная) информация, объем которой связан с качеством канала связи и применяемым протоколом передачи данных. Снижение качества канала связи приводит к необходимости повторной передачи информации, применения более сложных кодов и в дальнейшем будем полагать, что

$$I_{\text{сл}} = (k_1 + k_2) \sum_{n=1}^{N} I_n, \quad (3)$$

где k_1 = const, соответствующей избыточности применяемого кода, а k_2 – определяет трафик, связанный с необходимостью повторной передачи информации.

Число требуемых базовых станций, осуществляющих сбор информации от объектов, находящихся на обслуживаемой территории, определяется исходя из известных размеров зоны обслуживания одной базовой станции $Z_{БС}$ и требуемой зоны обслуживания мониторинговой системы Z:

$$N_{БС} = k_3 f\left(Z / Z_{БС} \right), \qquad (4)$$

где $f(x)$ – функция округления до целого; k_3 – коэффициент, характеризующий степень перекрытия (двойного или тройного покрытия) требуемой территории зонами обслуживания базовой станции

При проведении тестовых расчетов по формулам (1)–(4) в качестве входных параметров рассматриваемой модели задавались значения, приведенные в табл. 3.

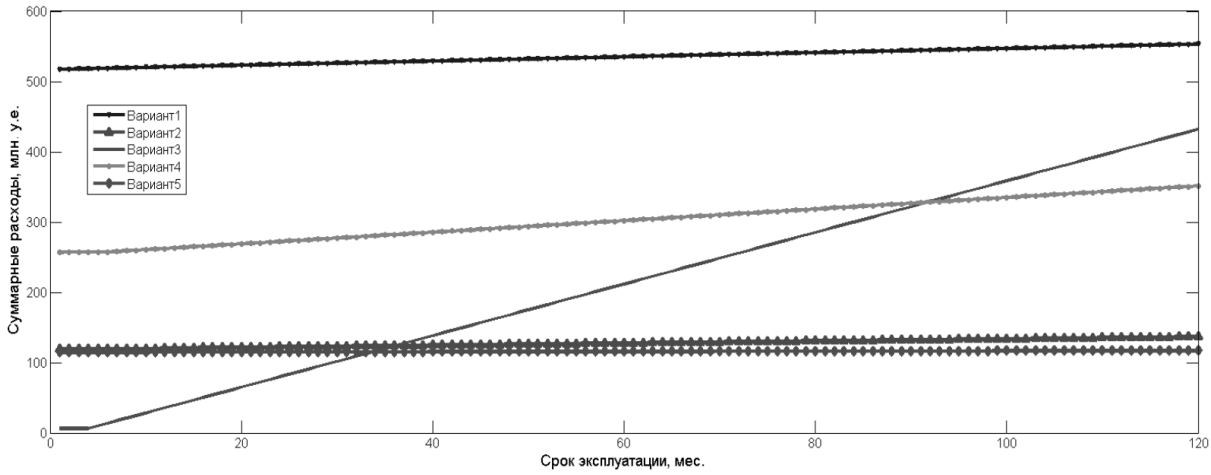
Во всех случаях необходимо обеспечить мониторинг 400 транспортных средств с периодичностью один раз в 15 мин. Объем передаваемой от каждого объекта мониторинга информации – 50 байт. Скорости передачи в каждом канале для первых четырех вариантов построения подсистемы связи даны в пересчете от скоростей в 2,4 до 4,8 Кбит/с. В пятой системе информация передается в узкой полосе со скоростью 4 бита/с, что позволяет увеличить зону уверенного приема сигналов. Число каналов в каждой базовых станций систем 4, 2, 8, 4, 1 соответственно. Таким образом, построение системы по третьему варианту предполагает использование каналов с самой большой пропускной способностью, по пятому варианту – каналов с самой низкой пропускной способностью. Результаты расчетов для интервала времени в 10 лет и требуемой зоны обслуживания в 5000 км^2 приведены на рисунке.

Как видно из данного рисунка, относительно небольшая зона обслуживания базовой станции первой из рассматриваемых систем приводит к необходимости покупки и развертывания большого количества таких станций, что требует внушительных начальных вложений. В дальнейшем суммарные расходы на эксплуатацию системы растут незначительно. Проведение работ по модернизации оборудования с целью увеличения

Таблица 3

Входные параметры модели

Параметр	Варианты построения системы связи				
	1	2	3	4	5
N, шт.	400	400	400	400	400
Δt, ч	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
$I_п$, байт	50	50	50	50	50
$I_{БС}$, байт/ч	$4{,}4\cdot10^6$	$4{,}4\cdot10^6$	$8{,}8\cdot10^6$	$8{,}8\cdot10^6$	$1{,}8\cdot10^3$
$I_К$, байт/ч	$1{,}1\cdot10^6$	$2{,}2\cdot10^6$	$1{,}1\cdot10^6$	$2{,}2\cdot10^6$	$1{,}8\cdot10^3$
$Z_{БС}$, км^2	$4\cdot10^2$	$6\cdot10^2$	$5\cdot10^7$	$9\cdot10^2$	$4\cdot10^6$
C_1, у. е.	$5\cdot10^6$	$10\cdot10^7$	0	$1{,}5\cdot10^7$	$2{,}5\cdot10^6$
C_2, у. е.	$5\cdot10^3$	$8\cdot10^3$	$15\cdot10^3$	$5\cdot10^3$	$5\cdot10^3$
C_3, у. е.	$20\cdot10^6$	$0{,}5\cdot10^6$	0	$20\cdot10^6$	$10\cdot10^6$
C_4, у. е.	$10\cdot10^6$	$0{,}5\cdot10^6$	0	$10\cdot10^6$	$0{,}5\cdot10^6$
C_5, у. е. за Кбит	0	0	3,0	0,5	0
C_6, у. е. в мес.	$1{,}5\cdot10^5$	$0{,}75\cdot10^5$	$1{,}25\cdot10^4$	$3\cdot10^4$	$1\cdot10^4$
C_7, у. е. в мес.	$3\cdot10^5$	$1{,}5\cdot10^5$	$2{,}5\cdot10^4$	$6\cdot10^4$	$2\cdot10^4$
k_1	2	2	1,5	2	3
k_2	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5
k_3	1,3	1,3	1,5	1,3	1,3



Зависимости суммарных расходов на эксплуатацию мониторинговой системы от времени

зоны обслуживания базовой станции и повышению пропускной способности ее каналов связи, приводит к значительному снижению начальных вложений (вариант 2). Третий вариант является самым привлекательным на начальном этапе работ по развертыванию и эксплуатации системы. Но необходимость постоянной оплаты услуг стороннего оператора связи со временем превращает такой способ организации информационного обмена в самый затратный.

То же можно сказать и о четвертом варианте построения подсистемы связи. Пятый вариант, несмотря на самую низкую привлекательность на начальном этапе рассмотрения возможных альтернатив, связанную с низкой пропускной способностью каналов связи, необходимостью использования кодирования с относительно большой избыточностью и протоколов, предусматривающих повторную передачу информации в случае ее непрохождения с первой попытки, оказался в итоге самым экономичным.

Рассмотренная методика анализа различных вариантов построения подсистем связи позволяет получать оценки суммарных затрат на эксплуатацию таких подсистем и осуществлять выбор нужного варианта из существующих альтернатив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Невдяев, Л.М.** Персональная спутниковая связь [Текст] / Л.М. Невдяев, А.А. Смирнов. –М.: Эко – Трендз, 1998. –215 с.

2. **Невдяев, Л.М.** Спутниковые системы контроля за перевозками грузов – новый вид телекоммуникационных услуг [Текст] / Л.М. Невдяев, В.М. Тамаркин; Под ред. А.А. Смирнова // Корпоративные системы спутниковой и КВ связи. –М.: Эко–Трендз, 1997. –С. 56–88.

3. **Loisy, C.** European mobile satellite services (EMSS) regional system for Europe [Text] / C. Loisy [et al.] / International Mobile Satellite Conf. IMSC'95. –Ottawa, 1995.

4. **Майстренко, В.А.** Организация системы связи континентального мониторинга [Текст] / В.А. Майстренко, Д.В. Федосов, В.Л. Хазан // XI Междунар. науч.-техн. конф. Радиолокация, навигация, связь. –Воронеж. –2005. –Т. III. –С. 2067–2072.

5. **Fedosov, D.V.** Communication Problems in Global Monitoring Systems [Text] / D.V. Fedosov, V.L. Hazan, D.A. Korneev // IEEE Redion & Sibiroon 2008. –С. 453–456.

6. **Хазан, В.Л.** Транкинговые системы связи СВ-КВ диапазонов радиоволн с мобильной базовой станцией [Текст] / В.Л. Хазан, А.Н. Юрьев, Д.В. Федосов // Вестник Сибирской гос. автомобильно-дорожной академии. –Омск, 2010. –Вып. –№ 3 (17). –С. 34–40.

УДК 621.394.6

А.Е. Давыдов

АПОСТЕРИОРНО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАФИКА В СЕТЯХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

При проектировании телекоммуникационных сетей с коммутацией пакетов и управлении обслуживанием трафика важное значение имеет прогнозирование нагрузки как на сеть связи в целом, так и на отдельные ее элементы.

Задача прогнозирования информационной нагрузки осложняется тем, что нередко невозможно провести адекватный натурный эксперимент в целях набора статистики. Вследствие этого возрастает априорная неопределенность исходных данных, а задачу распределения трафика приходится решать в реальном масштабе времени.

При анализе трафика в сетях с коммутацией пакетов выяснилось, что он обладает свойством самоподобия, из-за чего расчеты, проведенные по классическим формулам, приводят к некорректным результатам. Самоподобный трафик характеризуется медленно убывающей зависимостью автокорреляционной функции, что позволяет более точно (по сравнению с классическими потоками) прогнозировать изменения его параметров [1].

В настоящее время активно разрабатываются методы прогнозирования самоподобного трафика. Подавляющее большинство из них используют полиномы, в которых степень корреляции значений временного ряда учитывается коэффициентами. Следует отметить, что указанный подход является лишь модификацией известных, классических методов прогнозирования, которые изначально не учитывали особенности длительного интервала корреляции значений временного ряда и, как следствие, не используют указанное достоинство.

В статье предлагается метод прогнозирования трафика в сетях с коммутацией пакетов, обнаруживающий и использующий корреляционные зависимости между отрезками значений временного ряда при различных смещениях (лагах).

Статистическая таблица и методика апостериорно-вероятностного прогнозирования нагрузки

Рассмотрим временной ряд значений абонентской нагрузки в сети связи $x(t_i)$, $i = 1, 2, ...$, где отсчеты $x(t_i)$ вычисляются на непересекающихся интервалах времени $[t_i - T; t_i]$.

По результатам моделирования или наблюдения за обслуживанием нагрузки в сети связи разделим множество значений $x(t_i)$ на уровни $\hat{x}_m$, $m = 0, ..., M$; $\hat{x}_0 = 0$. Каждому из уровней нагрузки соответствует фиксированный объем сетевых ресурсов, необходимый для его качественного обслуживания.

Уровнем квантования i-го отсчета $x(t_i)$ будем называть максимальное число m ($m = 0, ..., M$), при котором $x(t_i) \geq \hat{x}_m$.

Предположим наличие статистической зависимости между $m(t_{i+k})$ – уровнем квантования ($i + k$)-го члена временного ряда ($k = 1, ..., K$) – и уровнями квантования предыдущих членов $m(t_i)$, $m(t_{i-1})$, ..., $m(t_{i-N})$. Это предположение позволяет рассматривать условные вероятности попадания члена $x(t_{i+k})$ в m-й уровень $\mathrm{P}(m(t_{i+k}) | m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$. Ниже предлагается метод апостериорно-вероятностного прогнозирования нагрузки.

По результатам наблюдений составляется таблица. Первые ($N + 1$) столбцов таблицы содержат все комбинации уровней квантования текущего и N предыдущих членов ряда x_i, x_{i-1}, ..., x_{i-N}. Число строк таблицы равно M^{N+1} (для $N = 2$ см. табл. 1).

Следующие KM столбцов таблицы содержат значение переменной $n_{i+k,m}(m(t_i), m(t_{i-1}), ..., m(t_{i-N}))$ – число наблюдавшихся попаданий ($i + k$)-го члена ряда в m-й уровень квантования при условии наблюдения последовательности уровней квантования $m(t_i), m(t_{i-1}), ..., m(t_{i-N})$ N предыдущих членов ряда.

Число N-последовательностей, участвующих в прогнозе уровня квантования члена временного ряда x_{i+k}, зависит от его номера k (см. рис.). Так, прогноз уровня квантования следующего за наблюдаемым члена ряда ($k = 1$) производится по K N-последовательностям. Прогноз уровня квантования члена ряда, отстоящего от наблюдаемого на K отсчетов ($k = K$), производится по одной

Таблица 1

Наблюдаемые уровни квантования членов временного ряда

Уровни отсчетов			Первый прогнозируемый отсчет (отсчет x_{i+1})			…	K-й прогнозируемый отсчет (отсчет x_{i+K})		
x_{i-2}	x_{i-1}	x_i	Уровень 1	…	Уровень M	…	Уровень 1	…	Уровень M
1	1	1	$n_{i+1,1}(1,1,1)$	…	$n_{i+1,M}(1,1,1)$	…	$n_{i+K,1}(1,1,1)$	…	$n_{i+K,M}(1,1,1)$
2			$n_{i+1,1}(1,1,2)$	…	$n_{i+1,M}(1,1,2)$	…	$n_{i+K,1}(1,1,2)$	…	$n_{i+K,M}(1,1,2)$
…			…	…	…	…	…	…	…
M			$n_{i+1,1}(1,1,M)$	…	$n_{i+1,M}(1,1,M)$	…	$n_{i+K,1}(1,1,M)$	…	$n_{i+K,M}(1,1,M)$
1	2		$n_{i+1,1}(1,2,1)$	…	$n_{i+1,M}(1,2,1)$	…	$n_{i+K,1}(1,2,1)$	…	$n_{i+K,M}(1,2,1)$
2			$n_{i+1,1}(1,2,2)$	…	$n_{i+1,M}(1,2,2)$	…	$n_{i+K,1}(1,2,2)$	…	$n_{i+K,M}(1,2,2)$
…			…	…	…	…	…	…	…
M			$n_{i+1,1}(1,2,M)$	…	$n_{i+1,M}(1,2,M)$	…	$n_{i+K,1}(1,2,M)$	…	$n_{i+K,M}(1,2,M)$
…	…		…	…	…	…	…	…	…
1	M		$n_{i+1,1}(1,M,1)$	…	$n_{i+1,M}(1,M,1)$	…	$n_{i+K,1}(1,M,1)$	…	$n_{i+K,M}(1,M,1)$
2			$n_{i+1,1}(1,M,2)$	…	$n_{i+1,M}(1,M,2)$	…	$n_{i+K,1}(1,M,2)$	…	$n_{i+K,M}(1,M,2)$
…			…	…	…	…	…	…	…
M			$n_{i+1,1}(1,M,M)$	…	$n_{i+1,M}(1,M,M)$	…	$n_{i+K,1}(1,M,M)$	…	$n_{i+K,M}(1,M,M)$
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
M	M	M	$n_{i+1,1}(M,M,M)$	…	$n_{i+1,M}(M,M,M)$	…	$n_{i+K,1}(M,M,M)$	…	$n_{i+K,M}(M,M,M)$

N-последовательности. В общем, для определения уровня ($i + k$)-го отсчета в таблице имеется ($K - k + 1$) временных N-последовательностей наблюдаемых значений.

Методика апостериорно-вероятностного прогнозирования нагрузки следующая:

1. Зафиксировать номер прогнозируемого отсчета временного ряда $k \le K$.

2. Используя таблицу, для $m = 1, \dots, M$ вычислить вероятность m-го уровня квантования ($i + k$)-го члена ряда:

$$\mathrm{P}_{\Sigma}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), m(t_{i-1}), \dots, m(t_{i-K+k-N})) = \\ = \prod_{s=0}^{K-k+1} \mathrm{P}(m(t_{i+k+s}) \mid m^*(t_i), \dots, m^*(t_{i-N})), \quad (1)$$

где

$$m^*(t_i) = m^*(t_{i-s}); \dots; \; m^*(t_{i-N}) = m^*(t_{i-N-s}); \quad (2)$$

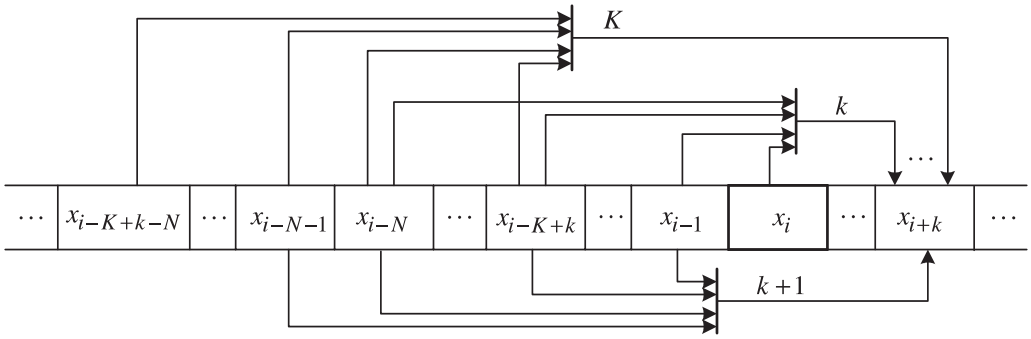
$$\mathrm{P}(m(t_{i+k+s}) \mid m^*(t_i), \dots, m^*(t_{i-N})) = \quad (3)$$

$$= \frac{n_{i+k+s,m}(m^*(t_i), \dots, m^*(t_{i-N}))}{\sum_{j=1}^{M} n_{i+k+s,j}(m^*(t_i), \dots, m^*(t_{i-N}))}.$$

Так как в таблице содержатся все возможные N-последовательности уровней квантования временного ряда, то для вычисления $\mathrm{P}_{\Sigma}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), \dots, m(t_{i-K+k-N}))$ требуется обратиться к таблице $(K - k + 1)$ раз. Каждый раз при сдвиге N-последовательности на один отсчет влево номер прогнозируемого отсчета будет увеличиваться на единицу (см. рис.).

Выражения (2) определяют сдвиг N-последовательности на один отсчет влево и ее поиск в N первых столбцах таблицы. Выражение (3) есть вероятность m-го уровня квантования при наблюдении последовательности уровней $m^*(t_i), \dots, m^*(t_{i-N})$.

Значение $n_{i+k+s,m}(m^*(t_i), \dots, m^*(t_{i-N}))$ содержится на пересечении строки $(m^*(t_i), \dots, m^*(t_{i-N}))$



Отсчеты для прогнозирования уровня (i+k)-го члена ряда

и столбца таблицы ($i + k + s$)-го прогнозируемого отсчета для данного значения m.

Выражение $\sum_{j=1}^{M} n_{i+k+s,j}(m^*(t_i), ..., m^*(t_{i-N}))$ есть сумма значений таблицы по строке $(m^*(t_i), ..., m^*(t_{i-N}))$ в столбце ($i + k + s$)-го прогнозируемого отсчета.

3. За наиболее вероятный прогнозируемый уровень квантования $\hat{m}(t_{i+k})$ ($i + k$)-го члена ряда выбирается тот, для которого вероятность $\mathrm{P}_\Sigma(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), m(t_{i-1}), ..., m(t_{i-K+k-N}))$ максимальна, т. е. $\hat{m}(t_{i+k}) = m(t_{i+k}) : \mathrm{P}_\Sigma(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), m(t_{i-1}), ..., m(t_{i-K+k-N})) \xrightarrow{m=1,...,M} \max$.

Для использования данных табл. 1 и представленных выражений требуется определить:

минимальное число наблюдений, необходимое для признания состоятельности вероятностей (3);

число K – глубину прогнозирования.

Определение минимального числа наблюдений

Значение $\mathrm{P}(m(t_{i+k+s}) \mid m^*(t_i), ..., m^*(t_{i-N}))$ получается по результатам статистических наблюдений. Знаменатель выражения (3) равен общему числу наблюдавшихся N-последовательностей $m^*(t_i), ..., m^*(t_{i-N})$ для ($k + s$)-го прогнозируемого отсчета:

$$N_{i+k+s}(m^*(t_i), ..., m^*(t_{i-N})) = \\ = \sum_{j=1}^{M} n_{i+k+s,j}(m^*(t_i), ..., m^*(t_{i-N})). \quad (4)$$

Числитель (3) равен числу положительных исходов – попаданию $x(t_{i+k+s})$ в m-й уровень.

Попадание $x(t_{i+k+s})$ в m-й уровень является дискретным событием. Оно в каждом наблюдении при фиксированных $m^*(t_i), ..., m^*(t_{i-N})$ может либо произойти, либо не произойти. Таким образом, задача определения минимально необходимого числа наблюдений сводится к оценке вероятности положительного исхода при ее биномиальном распределении по относительной частоте.

Для упрощения записи формул введем обозначения:

$$\mathrm{P}(*) = \mathrm{P}(m(t_{i+k+s}) \mid m^*(t_i), ..., m^*(t_{i-N})) ;$$

$$N(*) = N_{i+k+s}(m^*(t_i), ..., m^*(t_{i-N})) .$$

Границы доверительного интервала $p_1 < \mathrm{P}(*) < p_2$ находятся по формулам [2, 3]:

$$p_1 = \frac{N(*)}{t^2 + N(*)} \times \\ \times \left[\mathrm{P}(*) + \frac{t^2}{2N(*)} - t\sqrt{\frac{\mathrm{P}(*)(1-\mathrm{P}(*))}{N(*)} + \left(\frac{t}{2N(*)}\right)^2} \right], \\ p_2 = \frac{N(*)}{t^2 + N(*)} \times \\ \times \left[\mathrm{P}(*) + \frac{t^2}{2N(*)} + t\sqrt{\frac{\mathrm{P}(*)(1-\mathrm{P}(*))}{N(*)} + \left(\frac{t}{2N(*)}\right)^2} \right]. \quad (5)$$

Значение $t = \delta\sqrt{N(*)} / \sigma$ находится из соотношения:

$$\Phi(t) = \gamma/2 , \quad (6)$$

где γ – надежность (доверительная вероятность) оценки. Обычно принимается $\gamma = 0{,}95$.

Задавшись требуемой надежностью и величиной доверительного интервала, расчетным путем или по таблицам [4] можно определить минимальное число наблюдений.

При $\gamma = 0{,}95$ и $\Delta = p_2 - p_1 \le 0{,}2$ определим зависимость числа положительных исходов n от общего числа наблюдений $N(*)$ (табл. 2).

Из таблицы видно, что при 93 наблюдениях для любого числа положительных исходов оценка вероятности $\mathrm{P}(m(t_{i+k+s}) \mid m^*(t_i), ..., m^*(t_{i-N}))$

Таблица 2

Зависимость числа положительных исходов *n* от общего числа наблюдений *N*(∗)

Число наблюдений $N(*)$	Число положительных исходов n
70	(с 1 по 17) и (с 53 по 69)
80	(с 1 по 25) и (с 55 по 79)
90	(с 1 по 38) и (с 52 по 89)
92	(с 1 по 43) и (с 49 по 91)
93	с 1 по 92

с надежностью 0,95 попадает в двадцатипроцентный доверительный интервал. Поэтому при данных условиях число наблюдений в строке $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ и k-м столбце таблицы должно быть не менее 93. С увеличением числа наблюдений доверительный интервал будет уменьшаться.

Определение глубины прогнозирования

Определение глубины прогнозирования (максимального числа прогнозируемых отсчетов K) связано с выявлением зависимости между наблюдаемым событием $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ и прогнозом $m(t_{i+k})$, $k = 1, ..., K$.

Известно, что случайное событие Y не зависит от случайного события X, если условная вероятность появления события Y равна его безусловной вероятности [2]: $\mathrm{P}(Y \mid X) = \mathrm{P}(Y)$.

Для нашего случая $m(t_{i+k})$ не зависит $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$, если

$$\mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N})) = \mathrm{P}(m(t_{i+k})), \quad (7)$$

где

$$\mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N})) = \frac{n_{i+k,m}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))}{\sum_{j=1}^{M} n_{i+k,j}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))},$$

$$\mathrm{P}(m(t_{i+k})) = \frac{\sum_{m(t_i)=1}^{M} \cdots \sum_{m(t_{i-N})=1}^{M} n_{i+k,m}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))}{\sum_{m(t_i)=1}^{M} \cdots \sum_{m(t_{i-N})=1}^{M} \sum_{j=1}^{M} n_{i+k,j}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))}.$$

Статистическое определение независимости прогноза $m(t_{i+k})$ и события $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ сводится к проверке при заданном уровне значимости $\alpha = 1 - \gamma$ нулевой гипотезы о равенстве вероятностей биномиальных распределений (7).

Для упрощения записи формул введем обозначения:

$m_1 = n_{i+k,m}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ – число появления $m(t_{i+k})$ при $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$;

$n_1 = \sum_{j=1}^{M} n_{i+k,j}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ – общее число наблюдений при $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$;

$m_2 = \sum_{m(t_i)=1}^{M} \cdots \sum_{m(t_{i-N})=1}^{M} n_{i+k,m}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ – число появления $m(t_{i+k})$;

$n_2 = \sum_{m(t_i)=1}^{M} \cdots \sum_{m(t_{i-N})=1}^{M} \sum_{j=1}^{M} n_{i+k,j}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ – общее число наблюдений.

В этих обозначениях $\mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N})) = \frac{m_1}{n_1}$, $\mathrm{P}(m(t_{i+k})) = \frac{m_2}{n_2}$.

Чтобы при заданном уровне значимости α проверить нулевую гипотезу $H_0 : \mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N})) = \mathrm{P}(m(t_{i+k}))$ о равенстве вероятности появления событий в двух генеральных совокупностях, имеющих биномиальное распределение, при конкурирующей $H_1 : \mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N})) \neq \mathrm{P}(m(t_{i+k}))$ надо вычислить наблюдаемое значение критерия

$$U = \frac{m_1 / n_1 - m_2 / n_2}{\sqrt{\frac{m_1 + m_2}{n_1 + n_2}\left(1 - \frac{m_1 + m_2}{n_1 + n_2}\right)\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (8)$$

и по таблице функции Лапласа найти критическую точку $u_{кр}$ по равенству $\Phi(u_{кр}) = (1 - \alpha)/2$.

Величина U при справедливости нулевой гипотезы распределена приближенно нормально с нулевым математическим ожиданием и единичным средним квадратическим отклонением.

Если $|U| \le u_{кр}$, то нет оснований отвергать нулевую гипотезу, а событие $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ и прогноз $m(t_{i+k})$ считаются зависимыми.

Если $|U| > u_{кр}$, то нулевая гипотеза отвергается, а событие $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ и прогноз $m(t_{i+k})$ считаются независимыми.

Таким образом, глубина прогнозирования есть максимальное число шагов K, при котором

для заданного уровня значимости α событие $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ и прогноз $m(t_{i+k})$ могут считаться зависимыми.

Если событие $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ и прогноз $m(t_{i+k})$ зависимы, то элемент таблицы $n_{i+k,m}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ представляет собой *данное, значимое для прогноза*.

Методика определения глубины прогнозирования позволяет увязать число прогнозируемых отсчетов K с числом анализируемых членов ряда $x_i, x_{i-1}, x_{i-2}, ..., x_{i-N}$. С увеличением N возрастает глубина, точность прогноза и число строк в таблице.

Процедура прогнозирования нагрузки при частично заполненной таблице

Таблица 1 заполняется при наблюдении за поступающей нагрузкой в процессе функционирования сети связи. В начале работы таблица будет заполнена фрагментарно, т. к. некоторые события $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ встречались менее необходимого числа раз, либо не встречались вообще. Для таких событий оценка $\mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ будет несостоятельна.

Нет оснований ждать, пока вся таблица заполнится значимыми для прогноза данными. Ранее было определено, что условная вероятность $\mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ вычисляется по $(K-k+1)$ наблюдениям. Поэтому для ее определения достаточно потребовать, чтобы последовательность из $(K-k+1)$ наблюдений содержала только значимые для прогноза события $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$.

Таким образом, при наблюдении очередного события $m(t_i)$ необходимо выполнить следующие действия:

1. Внести изменения в статистическую табл. 1.

2. Для всех заполненных элементов таблицы проверить гипотезу о зависимости событий $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ и $\mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$. Пометить элементы таблицы как значимые или незначимые для прогноза.

3. Если для данной глубины прогнозирования k число наблюдений $N_{i+k}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ меньше необходимого, то заблокировать следующий (четвертый) пункт на $(K-k+1)$ шагов. Выполнить это для всех $k = 1, ..., K$.

4. Используя только значимые для прогноза элементы таблицы, при m = 0, ..., M вычислить итоговую условную вероятность m-го уровня $(i+k)$-го прогнозируемого отсчета $\mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$.

Третий пункт не дает возможности использовать статистическое прогнозирование нагрузки в течение $(K-k+1)$ шагов, где k – номер прогнозируемого отсчета. В этом случае можно использовать непараметрические методы прогнозирования.

Апостериорно-вероятностный метод прогнозирования нагрузки позволяет указать M альтернативных значений прогнозируемой величины (попадания отсчета $x(t_{i+k})$ в m-й уровень квантования) с указанием вероятности прогноза.

Статистическое прогнозирование использует результаты предыдущих наблюдений за изменением нагрузки, которые содержатся в табл. 1. Данные таблицы обновляются при наблюдении каждого нового отсчета $x(t_i)$.

Определение минимального числа наблюдений $N_{i+k}(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ сводится к оценке вероятности положительного исхода (попадания $x(t_{i+k})$ в m-й уровень) при его биномиальном распределении по относительной частоте.

Определение глубины прогнозирования K сводится к статистическому определению независимости событий $m(t_{i+k})$ и $(m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ на основе проверки при заданном уровне значимости α нулевой гипотезы о равенстве вероятностей биномиальных распределений $\mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ и $\mathrm{P}(m(t_{i+k}))$.

Итоговая условная вероятность m-го уровня $(i+k)$-го прогнозируемого отсчета $\mathrm{P}(m(t_{i+k}) \mid m(t_i), ..., m(t_{i-N}))$ определяется согласно (1). При этом данные таблицы, незначимые для прогнозирования, должны игнорироваться.

Таблица 1 заполняется при наблюдении за поступающей нагрузкой в процессе функционирования сети связи. В этом смысле статистическое прогнозирование является самообучающейся процедурой. Можно прогнозировать нагрузку при частично заполненной таблице.

На время обучения апостериорно-вероятностный и непараметрические методы прогнозирования должны использоваться совместно.

Чем ближе скорость передачи канала к интенсивности трафика, тем меньше его потери, меньше вносимые задержки пакетов, выше коэффициент использования канала. Использование апостериорно-вероятностного метода прогнозирования трафика позволит динамически изменять скорость передачи канала, при этом будет динамически корректироваться сам закон распределения интенсивности его поступления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Городецкий, А.Я.** Фрактальные процессы в компьютерных сетях [Текст] / А.Я. Городецкий, В.С. Заборовский. –СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.

2. **Гмурман, В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов [Текст] / В.Е. Гмурман. –М.: Высш. шк., 2004.

3. **Брандт, З.** Статистические методы анализа наблюдений [Текст] / З. Брандт. –М.: Мир, 1975.

4. **Янко, Я.** Математико-статистические таблицы [Текст] / Я. Янко. –М.: Госстатиздат, 1961.

УДК 621.396.4

С.Б. Макаров, А.В. Рашич

ФОРМИРОВАНИЕ И ПРИЕМ СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ СИГНАЛОВ С OFDM

В сетях беспроводного широкополосного доступа применяются сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием (сигналы с OFDM), обеспечивающие высокую помехоустойчивость приема в условиях замираний в канале передачи. Эти сигналы применяются в цифровых системах Wi-Fi, WiMAX, DVB-T, DAB и DRM [1].

Основной недостаток многочастотных сигналов – высокое значение пик-фактора колебаний, приводящее к существенному ограничению мощности выходных усилителей радиопередатчиков, а при сокращении амплитуды колебаний – к повышению уровня межсимвольной и внутрисимвольной интерференции. Указанный недостаток значительно сужает область применения сигналов с OFDM и накладывает дополнительные ограничения на скорость передачи данных и достоверность приема.

Другой недостаток этих сигналов – высокий уровень внеполосных излучений по краям занимаемой полосы частот (малая скорость спада уровня внеполосных излучений), что требует увеличения частотных интервалов между каналами передачи информации [2].

В статье рассматриваются временные и спектральные характеристики, а также методы формирования и приема спектрально-эффективных сигналов с OFDM, имеющих пониженный пик-фактор и малый уровень внеполосных излучений.

Спектрально-эффективные сигналы с OFDM. Рассмотрим, прежде всего, общую форму записи классических сигналов с OFDM. На интервале времени от $-T/2$ до $T/2$ сигналы с OFDM на несущей частоте $f_н$ имеют вид:

$$z(t) = \mathrm{Re}\{e^{j\cdot 2\cdot\pi\cdot f_i\cdot t}\cdot\sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_n\cdot e^{j\omega_n t}\} = \\ = \mathrm{Re}\{e^{j\cdot 2\cdot\pi\cdot f_i\cdot t}s(t)\}, \quad (1)$$

где $\omega_n = n\cdot\omega_1 = 2\pi\cdot n\cdot 1/T$ $\omega_1 = 2\pi\cdot 1/T$; ω_n – n-я циклическая поднесущая частота; N – количество поднесущих частот; y_n – комплексный символ канального алфавита, предназначенный для модуляции n-й поднесущей частоты.

Отличие спектрально-эффективных сигналов с OFDM от классических сигналов с OFDM заключается в использовании в каждом из каналов формирования на поднесущей частоте скругленной формы вещественной огибающей. Аналитическая запись таких сигналов имеет вид:

$$z(t) = \mathrm{Re}\{e^{j2\pi f_i t}\sum_{n=-N/2}^{N/2-1} a(t)y_n e^{j\omega_n t}\} = \mathrm{Re}\{e^{j2\pi f_i t}s(t)\}, \\ s(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} a(t)y_n e^{j\omega_n t}. \quad (2)$$

Вид функции $a(t)$ выбирается исходя из требований к уровню внеполосных излучений по краям занимаемой полосы частот, величине пик-фактора колебаний, корреляционным свойствам передаваемых сигналов и пр.

Вид функции $a(t)$ может быть найден эмпирически, либо путем решения оптимизационной задачи. При построении систем передачи информации с частотным уплотнением важную роль играет выбор сигналов, обеспечивающих минимальный уровень внеполосных излучений. В общем случае поиск оптимальной функции $a(t)$ сводится к минимизации функционала [3] при наличии граничных условий и различного рода ограничений:

$$J = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega)\left|S(\omega)\right|^2 d\omega, \quad (3)$$

где $\left|S(\omega)\right|^2$ – спектральная плотность средней мощности сигнала, $g(\omega)$ определяет скорость спада спектра сигнала.

Можно показать [4], что в случае, когда $g(\omega)=\omega^{2n}$ функционал (3) можно преобразовать к виду:

$$J=(-1)^n\int_{-\infty}^{\infty}a(t)a^{(2n)}(t)\,dt,\ t\in[-T/2;T/2],\quad n=1,2,\ldots, \tag{4}$$

где $a(t)$ – модулирующая функция; $a^{2n}(t)$ – производная порядка $(2n)$. Будем использовать граничные условия вида $a^{(2n)}(t)|_{t=\pm T/2}=0$ и ограничения на энергию сигнала [4]. Найдем численное решение (4). Представим четную функцию $a(t)$ на интервале $[-T/2;\ T/2]$ рядом Фурье:

$$a(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{k=1}^{\infty}a_k\cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right). \tag{5}$$

Подставляя (5) в (4), учитывая конечное число членов m в разложении (5), получим

$$J=\frac{T}{2}\sum_{k=1}^{m}a_k^2\left(\frac{2\pi}{T}k\right)^{2n}. \tag{6}$$

Граничные условия при этом будут записаны в виде системы уравнений:

$$\begin{gathered}a(t)|_{t=\pm T/2}=\frac{a_0}{2}+\sum_{k=1}^{m}a_k=0,\\ a^{(2l)}(t)|_{t=\pm T/2}=(-1)^l\sum_{k=1}^{m}a_k\left(\frac{2\pi}{T}k\right)^{2l}=0,\\ l=1,2,\ldots,n,\end{gathered} \tag{7}$$

а ограничение на энергию сигнала:

$$E=\frac{Ta_0^2}{4}+\frac{T}{2}\sum_{k=1}^{m}a_k^2=1. \tag{8}$$

Таким образом, вариационная задача преобразовалась в задачу поиска условного экстремума функции m переменных при наличии уравнений связи (7) и (8).

Вид функции $a(t)$, являющейся численным решением оптимизационной задачи в случае использования m = 10 членов в разложении (5) и требуемой скорости спада спектра $g(\omega)=\omega^6$, n = 3, представлен на рис. 1 *а*. Коэффициенты в разложении (5) представлены в таблице.

Можно показать, что спектральная плотность средней мощности сигналов с OFDM равна сумме сдвинутых копий спектральных плотностей средней мощности одночастотного сигнала:

$$G_{\text{OFDM}}(\omega)=\sum_{n=-N/2}^{N/2-1}G(\omega-\omega_n), \tag{9}$$

где $G(\omega)$ – спектральная плотность средней мощности одночастотного сигнала, $\omega_n=2\pi n/T$ – циклическая частота n-й поднесущей.

На рис. 1 *б* сплошной линией показан энергетический спектр решения оптимизационной задачи. Основной лепесток энергетического спектра последовательности сигналов с огибающей $a(t)$ шире основного лепестка энергетического спектра классических сигналов. Однако скорость спада уровня внеполосных излучений значительно выше. Так, при отстройке $\omega T\le 5\pi$ уровень внеполосных излучений не выше –34 дБ. При отстройке $\omega T\ge 10\pi$ уровень внеполосных излучений не более –55 дБ.

Спектральная плотность средней мощности спектральяно-эффективных сигналов с огибающей $a(t)$ определяется через преобразование Фурье от функции $a(t)$, представленной через ряд Фурье:

$$\begin{aligned}S(\omega)&=\mathbb{F}\{a(t)\}=\int_{-T/2}^{T/2}a(t)e^{-j\omega t}dt=\\ &=\frac{a_0}{2}\int_{-T/2}^{T/2}e^{-j\omega t}dt+\sum_{k=1}^{m}a_k\int_{-T/2}^{T/2}\cos(\omega_k t)e^{-j\omega t}dt=\\ &=\frac{a_0}{2}T\frac{\sin(\omega T/2)}{(\omega T/2)}+\frac{T}{2}\sum_{k=1}^{m}a_k\times\\ &\times\left(\frac{\sin(\omega-\omega_k)T/2}{(\omega-\omega_k)T/2}+\frac{\sin(\omega+\omega_k)T/2}{(\omega+\omega_k)T/2}\right)=\\ &=\sum_{k=-m}^{m}\frac{a_kT}{2}\frac{\sin(\omega+\omega_k)T/2}{(\omega+\omega_k)T/2}.\end{aligned} \tag{10}$$

Энергетический спектр последовательности спектрально-эффективных сигналов с OFDM и с огибающей $a(t)$ в квадратурных составляющих на каждой поднесущей имеет вид:

$$\begin{aligned}&G_{\text{SE-OFDM}}(\omega)=\\ &=\sum_{n=-N/2}^{N/2-1}A_n\left(\sum_{k=-m}^{m}\frac{a_kT}{2}\frac{\sin(\omega+\omega_k-\omega_n)T/2}{(\omega+\omega_k-\omega_n)T/2}\right)^2=\\ &=\sum_{n=-N/2}^{N/2-1}A_n\left(\sum_{k=-m}^{m}\frac{a_kT}{2}\frac{\sin(\omega T+2\pi k-2\pi n)/2}{(\omega+2\pi k-2\pi n)/2}\right)^2.\end{aligned} \tag{11}$$

Рассмотрим ряд примеров. На рис. 2 представлены энергетические спектры случайных

Коэффициенты в разложении (5)

a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
1,5415	0,8961	0,0917	–0,0208	0,0069	–0,0029	0,0014	–0,0008	0,0005	–0,0003	0,0002

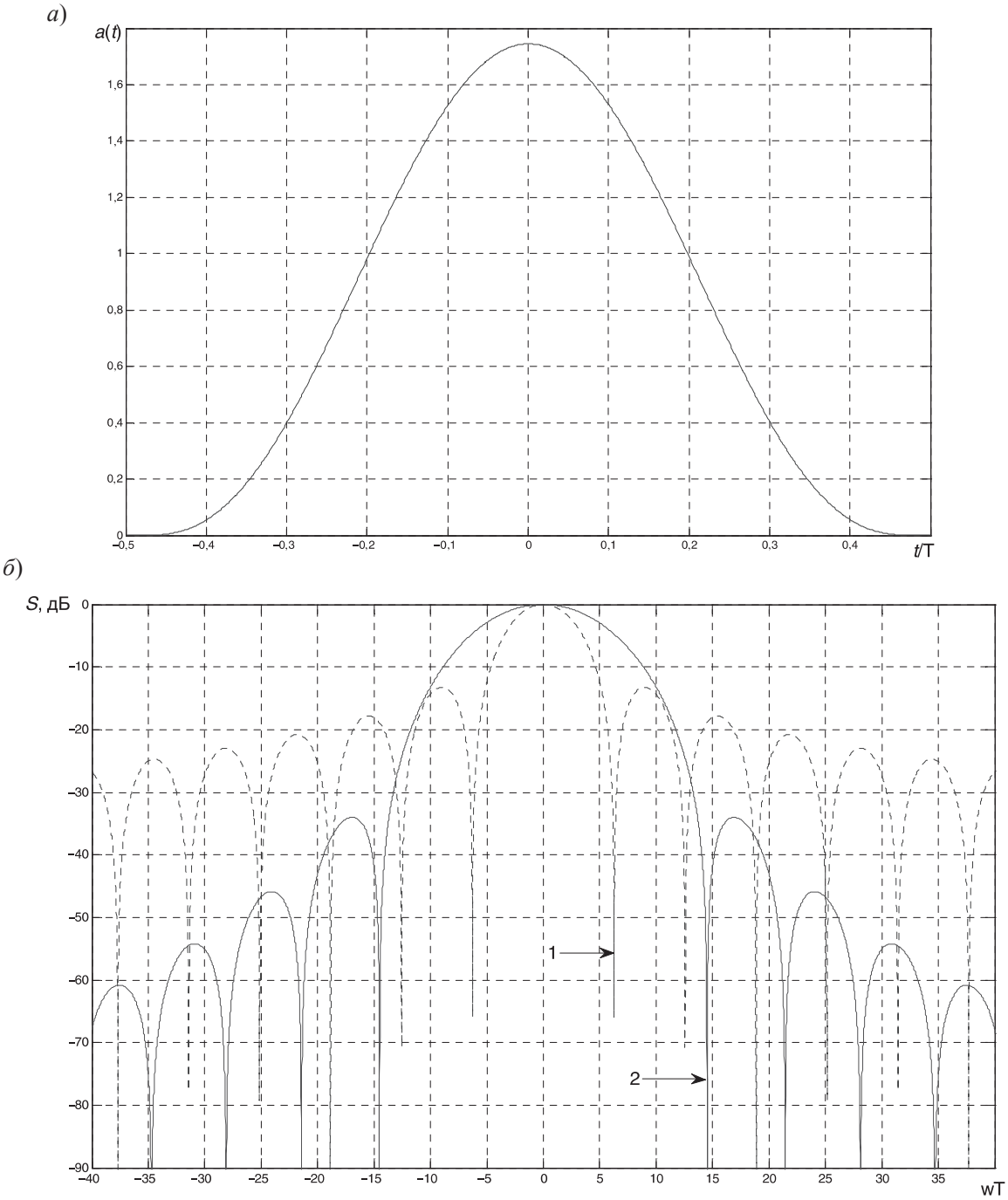


Рис. 1. Вид функции $a(t)$ (*а*) и энергетический спектр (*б*) последовательности сигналов
1 – прямоугольная огибающая; 2 – $a(t)$, $n = 3$, $m = 10$

последовательностей спектрально-эффективных сигналов с OFDM для следующих стандартов передачи информации, применяемых в беспроводных системах передачи данных: Wi-Fi (рис. 2 *а*), WiMAX (рис. 2 *б*), DVB-T (рис. 2 *в*). Энергетические спектры спектрально-эффективных сигналов с OFDM, имеющих вещественную огибающую на каждой поднесущей $a(t)$, приведены для скорости спада уровня внеполосных излучений $1/f^2$ ($n = 1$) и $1/f^6$ ($n = 3$) [4]. Число членов ряда Фурье $m = 10$.

Из рис. 2 *а* видно, что для сигналов с OFDM с оптимальной огибающей $a(t)$ при $n = 1$, $m = 10$ уровень внеполосных излучений при отстройке

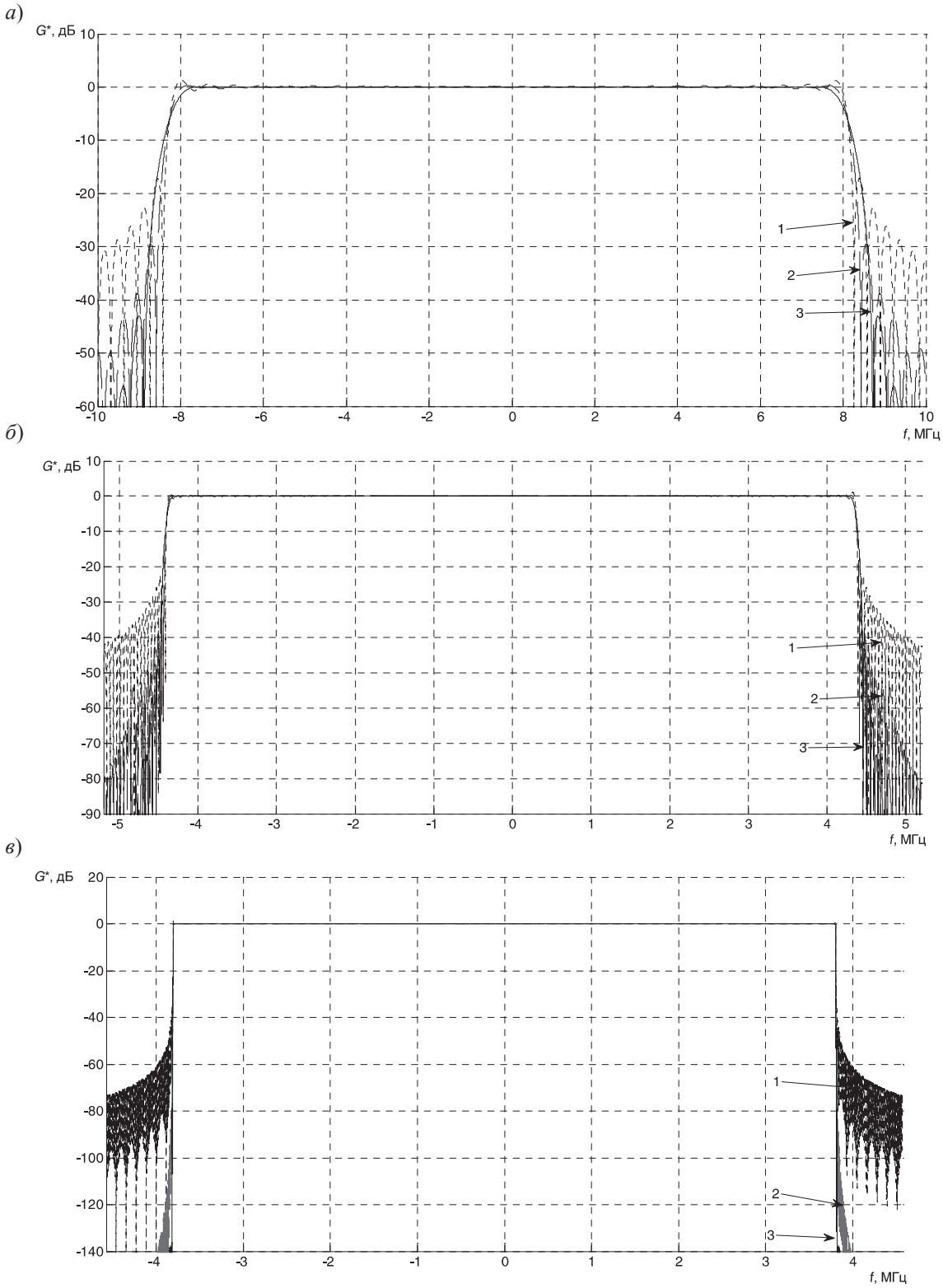


Рис. 2. Энергетический спектр спектрально-эффективных сигналов с OFDM:
а – $N = 64$; *б* – $N = 256$; *в* – $N = 8192$
1 – прямоугольная огибающая; 2 – $a(t)$, $n = 1$, $m = 10$; 3 – $a(t)$, $n = 3$, $m = 10$

на 8,8 МГц (стандарт IEEE 802.11-2007) не превышает (–38 дБ), а при $n = 3$, $m = 10$ – (–44 дБ). Уменьшение полосы занимаемых частот по уровню –40 дБ при переходе от классических сигналов с OFDM к спектрально-эффективным составляет около 25 % при $n = 1$ и 30 % при $n = 3$.

При увеличении числа поднесущих частот (рис. 2 *б*), уровень внеполосных излучений спектрально-эффективных сигналов с OFDM при отстройке по частоте на 4,5 МГц не превышает (–41 дБ) для огибающей $a(t)$ при $n = 1$, $m = 10$, и (–54 дБ) для $n = 3$, $m = 10$. Уменьшение полосы занимаемых частот по уровню –40 дБ при переходе от классических сигналов с OFDM к спектрально-эффективным составляет около 10 % при $n = 1$ и 11 % при $n = 3$.

Для наземного цифрового телевещания DVB-T (рис. 2 *в*) уровень внеполосных излучений сигналов с OFDM при отстройке по частоте на 3,810 МГц составляет (–49 дБ) для $a(t)$ при $n = 1$, $m = 10$ и (–67 дБ) при $n = 3$, $m = 10$. Уменьшение полосы занимаемых частот по уровню –40 дБ при переходе от классических сигналов с OFDM к спектрально-эффективным составляет примерно 0,33 % при $n = 1$ и 0,38 % при $n = 3$.

Формирование спектрально-эффективных сигналов с OFDM. Воспользуемся разложением (5) функции $a(t)$ на интервале $[-T/2; T/2]$ в ряд Фурье и учтем только m членов в разложении. Тогда

$$s(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_n a(t) e^{j\omega_n t} =$$

$$= \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_n \left(\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{m} a_k \cos\left(\frac{2\pi}{T} kt \right) \right) e^{j\omega_n t} = \quad (12)$$

$$= \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \frac{y_n}{2} \sum_{k=-m}^{m} a_k e^{j(\omega_n + \omega_k)t}.$$

Учитывая, что $\omega_n = 2\pi n / T$, то $\omega_n + \omega_k = \omega_{n+k}$ и

$$s(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \frac{y_n}{2} \sum_{k=-m}^{m} a_k e^{j\omega_{n+k} t}, \quad (13)$$

$a_k = a_{-k}$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., \pm m$.

Из (13) видно, что в результате применения вещественной огибающей непрямоугольной формы каждая составляющая для n-й поднесущей распадается на сумму $2m + 1$ гармонических составляющих, сосредоточенных вблизи n-й поднесущей. Коэффициент при n-й поднесущей будет определяться $2m + 1$ коэффициентами от соседних $2m$ частот и собственно n-й частоты:

$$C_n = \sum_{k=-m}^{m} y_{n+k} a_k, \quad (14)$$

где $n = -N/2, (-N/2+1), ..., (N/2-1)$, $a_k = a_{-k}$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., \pm m$, C_n – новый комплексный символ канального алфавита, $y_{n+k} = 0$, $(n+k) > N/2 - 1$, $(n+k) < -N/2$.

Таким образом, количество используемых поднесущих увеличивается на $2m$: по m с каждой стороны диапазона используемых частот. Вследствие того, что при фиксированной длительности сигнала размерность БПФ/ОБПФ однозначно определяет частоту дискретизации, увеличение количества поднесущих в сигнале ведет к увеличению частоты дискретизации, полосы занимаемых частот и изменению параметров системы.

Предположим, что в классическом сигнале с OFDM из сетки частот ω_n, $n = -N/2, (-N/2+1), ..., (N/2-1)$ используются только частоты с индексами от n_1 до n_2, $n_2 > n_1$ причем $|n_1|$, $|n_2| \geq m$. Амплитуды поднесущих с индексами, лежащими вне диапазона от n_1 до n_2 равны нулю. Тогда спектрально-эффективный сигнал с OFDM можно записать в виде

$$s(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} C_n e^{j\omega_n t} = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \left(\sum_{k=-m}^{m} y_{n+k} a_k \right) e^{j\omega_n t}, \quad (15)$$

при $y_{n+k} = 0$, $(n+k) > n_2$, $(n+k) < n_1$.

Таким образом, в результате линейного преобразования y_n представим сигнал с OFDM в виде, возможном для формирования с помощью ОБПФ.

Преобразование (14) удобно записать в векторном виде. Введем обозначение: вектор символов канального алфавита – $\vec{y} = \{y_{-N/2}, y_{-N/2+1}, ..., y_0, ..., y_{N/2-1}\}^T$ и вектор преобразованных символов – $\vec{C} = \{C_{-N/2}, C_{-N/2+1}, ..., ..., C_0, ..., C_{N/2-1}\}^T$.

Рассмотрим случай, когда количество поднесущих N равно

$$N = N_{\text{исп}} + 2m, \quad (16)$$

где $N_{\text{исп}}$ – количество используемых поднесущих (ненулевых элементов) в векторе $\vec{y}$.

Тогда преобразование (14) можно записать в матричном виде:

$$M \cdot \vec{y} = \vec{C}, \quad (17)$$

где в строках квадратной матрицы преобразования M размером $N \times N$ записаны коэффициенты a_k.

Элементы матрицы M с индексами $i = 1, 2, ..., m, (N - m + 1), ..., N$, $j = 1, 2, ..., m, (N - m + 1), ..., N$, где i – номер строки в M, а j – номер столбца в M, могут принимать произвольное значение, т. к. они не влияют на значение эле-

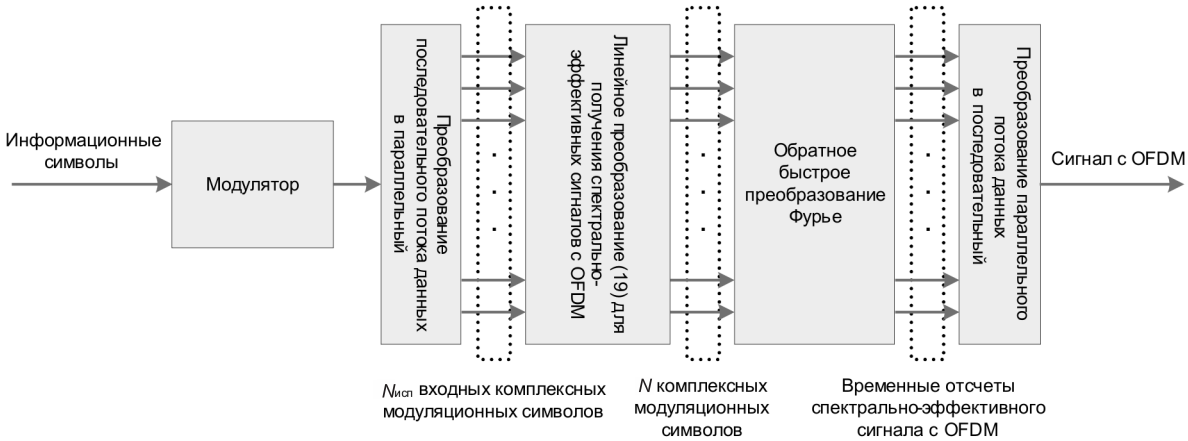


Рис. 3. Структурная схема устройства формирования спектрально-эффективных сигналов с OFDM

ментов C_n, $n = 1, 2, ..., m, (N - m + 1), ..., N$. В выражении (17) указанные элементы выбраны из соображений симметричности и отличия от нуля детерминанта матрицы M, что, вообще-то говоря, не является обязательным. Выбор конкретных значений описанных элементов матрицы M необходимо осуществлять исходя из реализуемого алгоритма приема.

На рис. 3 представлена схема устройства формирования спектрально-эффективных сигналов с OFDM. Устройство содержит традиционные блоки отображения информационных символов в символы канального алфавита, преобразования данных из последовательного представления в параллельное, ОБПФ и преобразование отсчетов с выхода блока ОБПФ в последовательный вид. В устройство добавляется новый блок перед блоком ОБПФ, осуществляющий линейное преобразование (14) над входными символами канального алфавита.

Сложность преобразования (14) определяется количеством поднесущих частот. Число операций умножения равно N^2, операций сложения – $N(N - 1)$. Учитывая, что значительное число элементов матрицы M равно нулю, количество операций умножения и сложения можно снизить до $(N_{исп} + 2m)(2m + 1)$ и $2m(N_{исп} + 2m)$ соответственно.

Прием спектрально-эффективных сигналов с OFDM. Реализация алгоритмов приема спектрально-эффективных сигналов с OFDM основана на представлении процедуры формирования решетчатой структурой (рис. 4). В узлах решетки находятся точки, соответствующие входным символам канального алфавита до преобразования (14). Входная последовательность символов соответствует некоторому пути на решетке. Например, пути 1 соответствует последо-

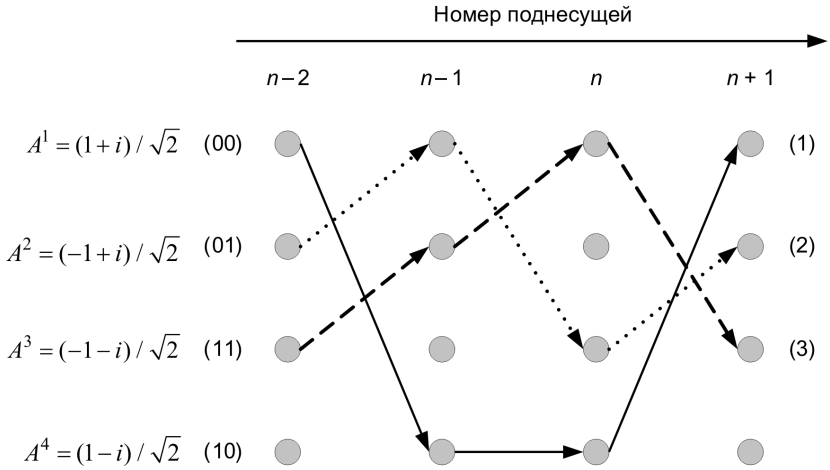


Рис. 4. Решетка формирования спектрально-эффективных сигналов с OFDM при модуляции ФМ-4

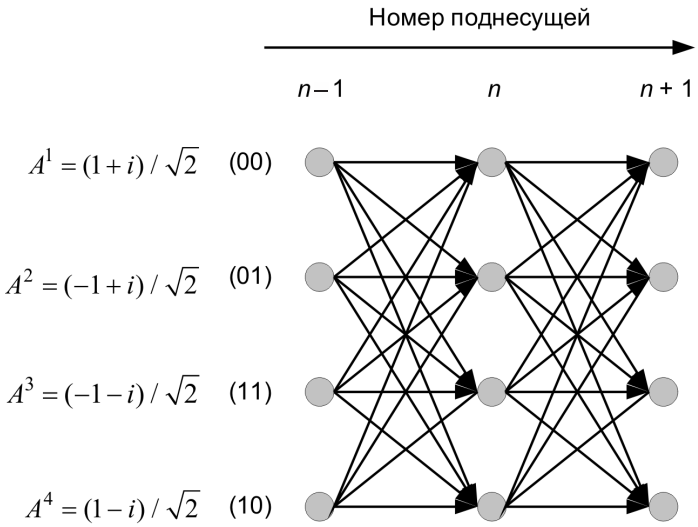


Рис. 5. Фрагмент решетки спектрально-эффективного сигнала с OFDM со всеми возможными переходами при учете первых двух символов в разложении огибающей в ряд Фурье и модуляции ФМ-4

вательность битов 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, пути 2 – 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1 и пути 3 – 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1.

Каждому ребру соответствует определенный комплексный символ на выходе преобразования, являющийся отсчетом спектрально-эффективного сигнала с OFDM в частотной области. Количество ребер, выходящих из одного узла, определяется количеством членов m в разложении огибающей в ряд Фурье. В практически важных случаях модуль всех коэффициентов в разложении огибающей в ряд Фурье, кроме первых двух-трех, относительно невелик и может не учитываться при анализе.

Учет только первых двух коэффициентов при анализе решетки спектрально-эффективного сигнала с OFDM приводит к тому, что количество ребер, выходящее из данного узла, равно четырем (рис. 5).

Задачу приема спектрально-эффективных сигналов с OFDM можно рассматривать как задачу нахождения пути по решетке с помощью определенных правил демодуляции. Обработка данных осуществляется в частотной области, а не во временной, как в классическом алгоритме Витерби. При приеме спектрально-эффективного сигнала с OFDM на каждом переходе между соседними поднесущими частотами определяется метрика для каждого пути на решетке. В начале демодуляции количество путей экспоненциально растет, затем появляется возможность на каждом шаге исключить такое количество «старых» путей, которое соответствует количеству вновь появившихся. На каждом шаге работы алгоритма для каждого узла рассчитываются метрики всех четырех путей, входящих в данный узел, из них оставляется путь с наименьшей метрикой, а остальные пути удаляются. При любых принятых впоследствии данных метрика этих путей не станет лучше метрики «выжившего» пути. Таким образом, в памяти приемника всегда содержится четыре пути, один из которых наиболее правдоподобный.

При приеме спектрально-эффективных сигналов с OFDM метрика рассчитывается на основании следующего выражения:

$$d_{n+1}^{k} = \left| \hat{C}_n - (y_{n-1}a_1 + y_n a_0 + A^k a_1) \right|^2 . \qquad (18)$$

Важным достоинством решетчатого алгоритма приема является то, что решение о переданных символах осуществляются после анализа всех поднесущих, и если в некотором узле был выбран неверный путь, то позднее он может слиться с верным. Более подробный анализ данного алгоритма и его вероятностных характеристик приведен в [5].

Применение спектрально-эффективных сигналов с OFDM позволяет уменьшить полосу занимаемых частот и увеличить скорость спада уровня внеполосных излучений. В частности, при использовании 64 поднесущих частот, уменьшение

полосы занимаемых частот составляет до 30 %.

Описан метод формирования спектрально-эффективных сигналов с OFDM с помощью ОБПФ и линейного преобразования входных символов канального алфавита. Данный метод можно реализовать с помощью цифрового устройства формирования сигналов с OFDM.

Предложен метод приема спектрально-эффективных сигналов с OFDM, основанный на использовании решетчатого алгоритма представления сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.», госконтракт № 07.514.12.4008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вишневский, В.М.** Широкополосные беспроводные сети передачи информации [Текст] / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной [и др.]. –М.: Техносфера, 2005. –592 с.

2. **Макаров, С.Б.** Снижение пик-фактора сигналов с ортогональным частотным уплотнением [Текст] / С.Б. Макаров, А.В. Рашич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2008. –№ 2(55). –С. 79–84.

3. **Макаров, С.Б.** Передача дискретных сообщений по радиоканалам с ограниченной полосой пропускания [Текст] / С.Б. Макаров, И.А. Цикин. –М.: Радио и связь, 1988. –304 с.

4. **Школьный, Л.А.** Оптимизация формы огибающей радиоимпульса по минимуму внеполосных излучений [Текст] / Л.А. Школьный // Радиотехника. –1975. –Т. 30. –№ 6. –С. 12–15.

5. **Атик, С.** Алгоритм приема спектрально-эффективных сигналов с OFDM [Текст] / С. Атик, С.Б. Макаров, А.В. Рашич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2010. –№ 3 (101). –С. 32–38.

УДК 621.391:355.40

А.В. Шишкалов, В.М. Медведев

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ КОДИРОВАНИИ

Одна из задач, решаемых с помощью методов теории систем массового обслуживания, – расчет интенсивности нагрузки узла телефонной сети. При этом величина интенсивности нагрузки характеризуется как среднее число ресурсов, занятых обслуживанием трафика на заданном интервале времени [1]. Если в каждый момент времени t из заданного интервала $[t_1, t_2]$ число занятых обслуживанием трафика ресурсов из данного набора равно $A(t)$, то средняя интенсивность трафика может быть оценена как

$$\overline{A}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} A(t)dt\,. \qquad (1)$$

Из выражения (1) следует, что для оценивания интенсивности нагрузки необходимо располагать данными о фрагментах активности каналов связи. В системах IP-телефонии (системы передачи речевых данных, построенных согласно рекомендациям H.323, SIP и т. д.) такая задача решается с помощью детекторов активности речи, устанавливающих флаг начала и окончания передачи фрагмента активности речи. В групповых сигналах с коммутацией каналов, примерами которых являются DTX-600, DTX-360, CS-8000, NCM-501 и т. д., а также в групповых сигналах спутниковых систем связи VSAT (Very Small Aperture Terminal), использующих фирменные (не описанные в международных рекомендациях) алгоритмы передачи данных, информация об активности речевых каналов не передается. Это обстоятельство затрудняет определение интенсивности нагрузки в заданные моменты времени, что в свою очередь затрудняет измерение и управление основными характеристиками качества обслуживания телекоммуникационных систем.

В данной статье рассматривается возможность определения фрагментов активности речевого канала с помощью структурно-статистических при-

знаков речевого сигнала при низкоскоростном кодировании.

Передача речевой информации характеризуется периодической сменой фрагментов активности и пауз в речевом сообщении. Перед передачей по каналу связи речевое сообщение проходит последовательные процедуры ИКМ-преобразования и кодирования низкоскоростным кодером речи [2]. На этапе ИКМ-обработки осуществляется преобразование амплитуды акустического речевого колебания в последовательность ИКМ-отсчетов, следующих со строго определенной скоростью (64 кбит/с).

Методы низкоскоростного кодирования речи (НКР) основаны на параметрическом кодировании, т. е. на представлении речевого сигнала набором медленно изменяющихся параметров [3, 4]. Такое представление речевых сигналов приводит к понижению скорости передачи цифрового потока. При представлении речевого сигнала в виде набора параметров из него исключается часть имеющейся в нем избыточности представления. Результат работы низкоскоростного кодера речи – формирование последовательности кадров параметров кодируемого речевого сигнала.

Для организации передачи в канале связи кадры параметров имеют строго определенные длину кадра и скорость передачи. Длины кадров и скорости их передачи зависят от используемого алгоритма НКР.

Рассмотрим взаимосвязь между характерными фрагментами в речевых сообщениях (фрагменты активности речи и фрагменты пауз) и особенности их проявлений в сигнале на выходе кодера НКР. На рис. 1 представлены фрагменты последовательности ИКМ-отсчетов (рис. 1 *а*) и соответствующие им фрагменты кадров передачи сообщения на выходе кодера речи (рис. 1 *б*). Из рисунка видно, что фрагменты активности канала C_1 и C_2, представленные в виде последовательности ИКМ-отсчетов, в результате кодирования кодером речи преобразуются в последовательность речевых кадров (фрагменты C'_1 и C'_2), содержащих в себе параметры речевого сообщения.

На рисунке следующие обозначения: $L_I^{(s)}$ – длина кадра речевого кодека; C_1, C_2 – фрагменты активности речевого канала в сигнале ИКМ; C'_1, C'_2 – проявление фрагментов C_1 и C_2 в канале передачи данных; B_1, B_2 – фрагменты пауз в сигнале ИКМ; B'_1, B'_2 – проявление фрагментов B_1 и B_2 в канале передачи данных.

При кодировании ИКМ-отсчетов, выражающих моменты неактивности паузы речевого канала (фрагменты B_1 и B_2), создаются речевые кадры, близкие по своей структуре (фрагменты B'_1 и B'_2). Это обстоятельство объясняется постоянством кодируемых параметров речевого сообщения в моменты неактивности речевого канала. Отсюда следует, что если речевой сигнал не меняется (передаются фрагменты паузы речи), то и параметры результатов преобразования речевого сигнала кодером речи будут постоянны.

Различие (в значениях соответствующих двоичных символов параметров преобразования речевого сообщения НКР) между последовательно передаваемыми речевыми кадрами будем характеризовать расстоянием Хэмминга $d_{i,j}$ в соответствующих двоичных символах между двумя принятыми речевыми кадрами i и j. На рис. 2 представлен пример передачи речевых кадров.

Из рисунка следует, что значение расстояния Хэмминга в последовательно передаваемых рече-

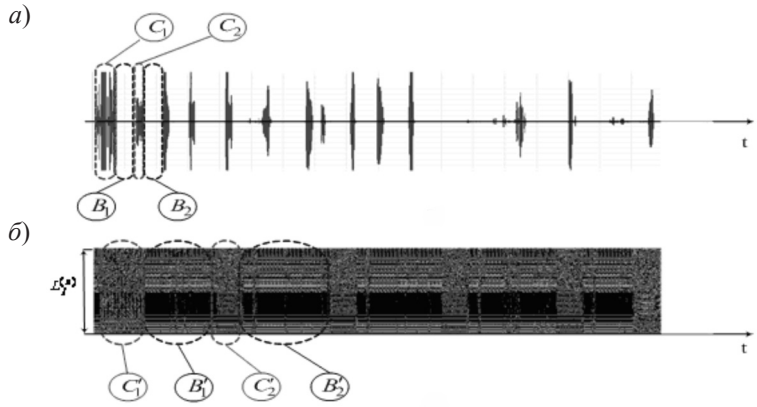


Рис. 1. Фрагменты последовательности ИКМ-отсчетов и соответствующие им фрагменты кадров кодера речи

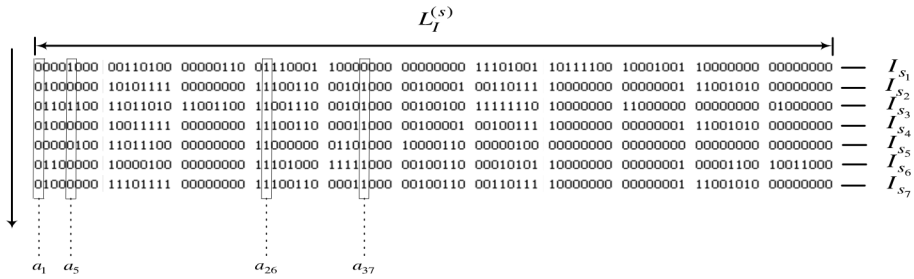


Рис. 2. Фрагмент передачи речевых кадров

вых кадрах $I_{s_1} - I_{s_8}$ для символа a_1 равно нулю, для символа a_5 – трем, для a_{26} – нулю, для a_{37} – единице. В силу того что принятые из спутникового канала связи речевые кадры могут иметь различные параметры, проявляющиеся в значениях двоичных символов, величина $d_{i,j}$ имеет случайный характер.

На рис. 3 показана зависимость параметра d от времени для примера, представленного на рис. 2.

Из рис. 3 следует, что фрагменты пауз в канале связи выражаются меньшим значением $d_{i,j}$, чем фрагменты активности речевого канала. В силу этого значение расстояния Хэмминга между принятыми речевыми кадрами может служить информативным признаком состояния канала связи (моменты активности и неактивности канала связи).

Речевые сообщения, передаваемые в современных системах спутниковой связи, кодируются в большинстве случаев по алгоритмам МСЭ G.729 и G.723.1. Наиболее применяемой из них является рекомендация G.723.1. Она используется для передачи речевых сообщений в следующих спутниковых системах связи: DialAway IP, SkyStar Adwantage, HNS PES, iDirect, SkyEdge и др.

Исследование структурных признаков речевых кадров и исследование поведения показателя $d_{i,j}$ для различных фрагментов передачи речи можно разделить на следующие этапы:

моделирование сигнала НКР, передаваемого в режиме неактивности речевого канала;

выявление структурных признаков, присущих сигналам НКР при передаче фазы неактивности канала, составление словаря признаков таких сигналов;

решение задачи распознавания речевых сигналов по выявленным признакам.

Для выявления структурных признаков речевого сигнала, присущих ему при передаче сигналов холостого хода, рассмотрим особенности и результаты этого исследования на выходе НКР. Осуществлено моделирование такого сигнала. При этом учитывалось, что на вход кодера речи поступают отсчеты фрагмента паузы после ИКМ, сформированные согласно рекомендации МСЭ G.711, (при известном описании формата отсчетов ИКМ и алгоритма, осуществляющего преобразование отсчетов ИКМ в кадры НКР), а их преобразование произведено в соответствии с алгоритмом НКР по рекомендации G.723.1. В сформированном таким образом сигнале осуществляется поиск стационарных фрагментов речевых кадров. Поиск стационарных фрагментов речевого кадра будем производить путем фиксации минимума суммы значений параметра $d_{i,j}$ между соответствующими двоичными символами анализируемых кадров.

В силу случайного характера поведения параметра $d_{i,j}$ в условиях наблюдения оценен закон распределения данного параметра. Для этого задавались требования по точности (доверительный интервал ε) и надежности (доверительная вероятность β) описания закона распределения, определивших требуемое число испытаний ($N_{тр}$) [5]. При ε = 0,01 и β = 0,95 число требуемых испытаний должно составить $N_{тр} \geq 9604$. Именно анализируемые 9600 кадров НКР составят интервал времени

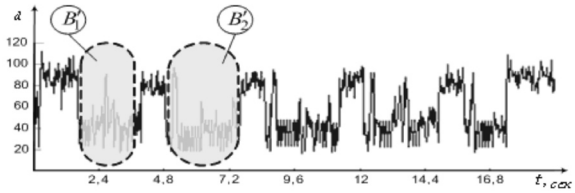


Рис. 3. Вид зависимости значений параметра d от времени

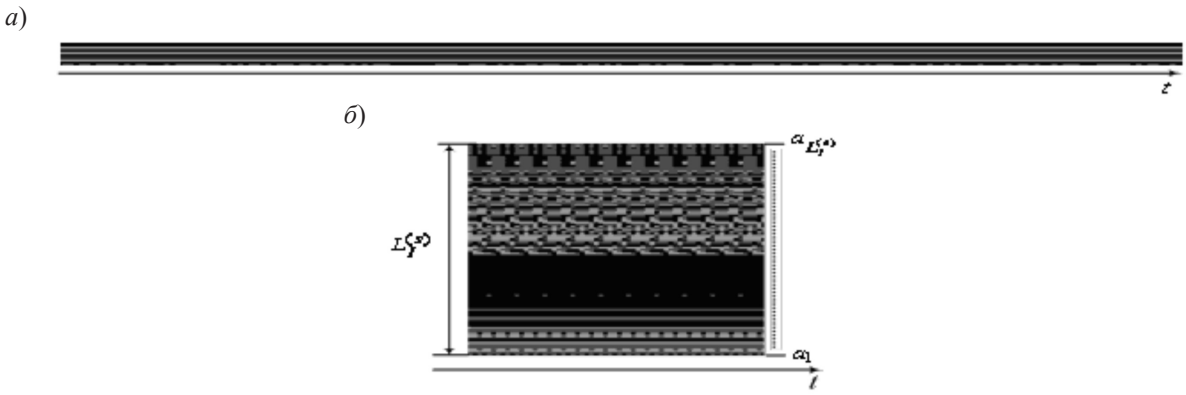


Рис. 4. Фрагмент речевого сигнала, передаваемого в режиме неактивности речевого канала связи

для выявления стационарности значений двоичных символов. Для НКР вида G.723.1 (при скорости передачи данных 6,4 кбит/с и периоде кадра равном 192 бита) время исследования интервала стационарности составляет порядка 288 с, для НКР вида G.729 (при скорости передачи данных 8 кбит/с и периоде кадра равном 80 бит), время интервала стационарности составляет порядка 96 с.

На рис. 4 *а* представлен фрагмент исходного ИКМ-сигнала, передаваемого в режиме неактивности канала связи, на рис. 4 *б* представлен результат кодирования этих отсчетов ИКМ в сигнал НКР G.723.1. Параметр $L_I^{(s)}$ обозначает период кадра НКР.

В результате анализа сигнала НКР G.723.1, передаваемого в режиме холостого хода и оценивания степени стационарности соответствующих двоичных символов речевых кадров, выявлено r двоичных символов (для НКР G.723.1 $r = 110$), не меняющих свое значение на протяжении всего эксперимента из $L_I^{(s)}$ двоичных символов, составляющих длину речевого кадра ($d = 0$). Остальные символы, меняющие свое значение на протяжении времени анализа, распределены по релеевскому закону распределения и в дальнейшем интересовать нас не будут. Оценивание закона распределения производено по методике, описанной в [5] при $\varepsilon = 0{,}01$ и $\beta = 0{,}95$. На рис. 5 представлена зависимость значения параметра d, измеренного в 9604 речевых кадрах сигнала НКР, от соответствующих двоичных символов, составляющих речевой кадр.

Таким образом, стационарность значений двоичных символов в речевых кадрах НКР позволяет сформировать структурные признаки речевых сигналов при передаче паузы речи. Это обстоятельство позволяет выявлять фрагменты активности и неактивности в канале связи при передаче речевых данных.

Отмечена зависимость между проявлениями активности/паузы речевого сигнала и структурой кадра НКР (см. рис. 1). При передачи фрагментов паузы речевого сигнала зафиксировано постоянство кодируемых параметров в кадре НКР.

Для проведения экспериментальных исследований числа двоичных символов, сохраняющих стационарность своих значений, заданы требо-

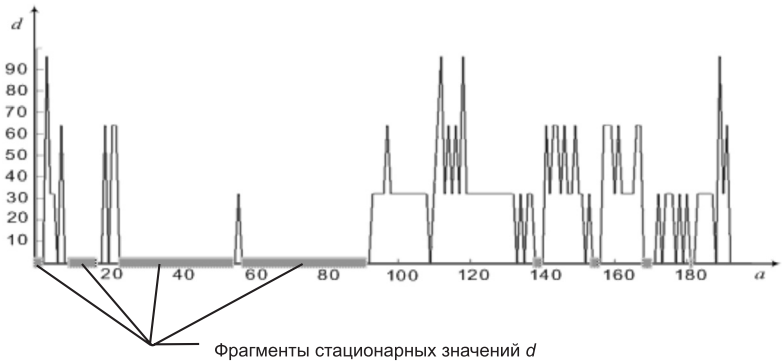


Рис. 5. Зависимость параметра d от номеров соответствующих двоичных символов, составляющих речевой кадр

вания по точности и надежности определения результатов и получено минимальное число требуемых для этого испытаний, позволившее определить интервал стационарности. Для НКР вида G.723.1 интервал стационарности составляет порядка 288 с, для НКР вида G.729 – 96 с.

Выявленные число r и расположение двоичных символов, проявляющих стационарность своего значения на периоде кадра НКР, позволят обеспечить распознавание состояния речевого канала по двум последовательно передаваемым кадрам НКР, при этом вероятность принятия ложного решения относительно состояния канала связи для сигналов НКР G.723.1 будет составлять 2^{-110} ($r = 110$), для сигналов НКР G.729 – 2^{-42} ($r = 42$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Крылов, В.В.** Теория телетрафика и ее приложения [Текст] / В.В. Крылов. –СПб.: БХВ-Петербург, 2005. –288 с.

2. **Григорьев, В.А.** Передача сигналов в зарубежных информационно-технических системах [Текст] / В.А. Григорьев. –СПб.: ВАС, 1998.

3. **Звонкович, В.Р.** Анализ метода интерполяции речевых сигналов [Текст] / В.Р. Звонкович // Электросвязь. –1985. –№ 7. –С. 22–25.

4. **Зюко, А.Г.** Методы низкоскоростного кодирования при цифровой передаче речи [Текст] / А.Г. Зюко, В.Л. Банкет, В.Ю. Лехан // Зарубежная радиоэлектроника. –1986. –№ 11.

5. **Юсупов, Р.М.** Статистические методы обработки результатов наблюдений [Текст] / Р.М. Юсупов, Г.Б. Петухов, В.Н. Сидоров [и др.]. –М.: МО СССР, 1984. –564 с.

УДК 681.5:62-5

Ю.А. Константинов, И.И. Крюков, М.М. Поскребышев, Н.А. Харламова

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СБОР ДАННЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ НА ЭТАПАХ ПРОИЗВОДСТВА

Оперативный контроль качества и быстрое принятие решения в производстве специальных волоконных световодов (ВС) имеют огромное значение. Все типовые процессы производства и контроля качества в современном производстве в высокой степени автоматизированы. Однако существуют некоторые этапы производства, для которых требуется сложная методика обработки результатов измерений, анализ ситуации и оперативное принятие решения в ходе технологического процесса. Ниже перечислены основные задачи, решенные авторами в рамках автоматизации некоторых этапов:

контроль диаметра заготовки в ходе процесса осаждения реагентов и обработки результатов измерений;

принятие решений об исправности оборудования;

процесс сохранения и преобразования данных измерения профиля показателя преломления в заготовке (преформе);

система обработки рефлектограмм вытянутых световодов и принятие решения об их годности.

Автоматизированный контроль диаметра в процессе производства преформы описан в [1]. Данные с видеокамеры поступают на персональный компьютер, включенный в корпоративную сеть. Данные со всех измерительных установок в необработанном и обработанном виде поступают в централизованную базу данных на сервер. После изготовления преформы происходит исследование ее профиля показателя преломления.

Любой волоконный световод вытягивается из заготовки, оптические характеристики которой определяют параметры изделия. На производстве специальных волоконных световодов, где контро-

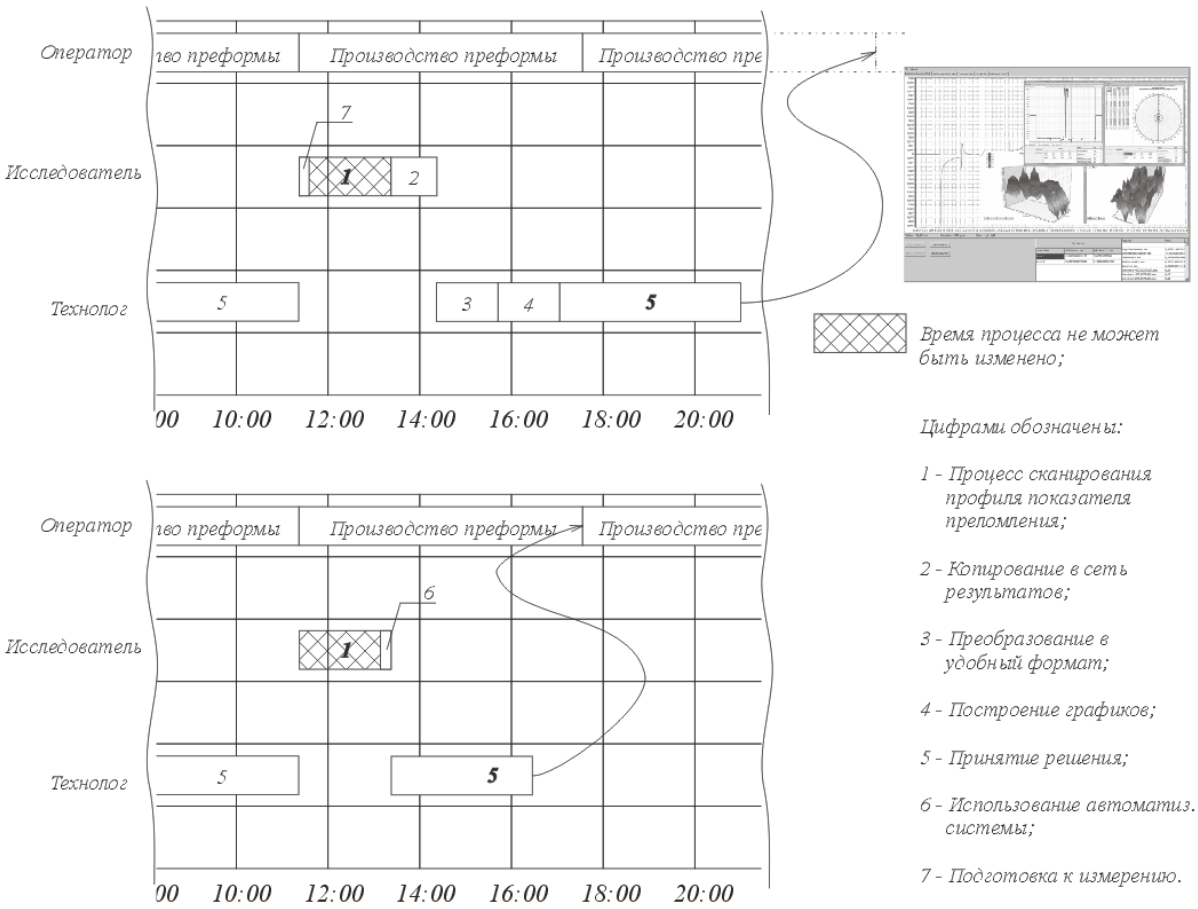


Рис. 1. Оптимизация процесса при использовании автоматизированной системы

лю показателя преломления должна подвергаться каждая заготовка, вопрос об автоматизации процесса сохранения, копирования и интерпретации результатов измерений особенно актуален.

Процесс обработки результатов измерений требует высокой квалификации исследователя и, в то же время, содержит большое количество продолжительных рутинных операций. Для уменьшения времени последних разработана автоматизированная система интерпретации результатов (рис. 1). В верхней части рисунка изображен процесс до применения системы, в нижней – после ее введения в эксплуатацию.

Система представляет собой комплекс программ, разработанных на языке макросов PKL и в средах программирования высокого уровня. PKL-макросы определяют характеристики и порядок измерений, количество и последовательность точек, а также позволяют в теле программы вызывать другие макросы, что дает возможность создания пользовательского интерфейса.

Макрос производит измерения и сохраняет результаты в типизированном файле, доступном для просмотра технологам, осуществляющим корректировку рецепта. Стандартное программное обеспечение не позволяет оперативно преобразовать данные в удобные форматы для последующей обработки, либо отображать интересующие исследователя и технолога зависимости.

Предлагаемая программа обладает полным набором функций не представленным ранее ни в одной исследовательской или CAD-системе. Пользователю оперативно предоставляются измеренные и расчетные данные о функции отклонения сканирующего луча, профиле показателя преломления, эволюции всех геометрических и оптических параметров по длине заготовки.

Далее преформа жакетируется (на нее наплавляются кварцевые трубы) и в готовом цилиндре при помощи системы ультразвукового сверления изготавливаются отверстия под нагружающие стержни, создающие в готовом изделии напря-

жения, необходимые для наведения в сердцевине ВС двулучепреломления [2].

Распределение двулучепреломления и поляризационных свойств в световоде по его длине характеризует поляризационная рефлектометрия [3]. Модификация поляризационной рефлектометрии, описанная в [4], предполагает использование интегрально-оптического поляризатора на подложке из ниобата лития, подключенного к выходу оптического рефлектометра. Исследователь при этом осуществляет работу с микроподвижками, ориентирующими волоконные выходы измерительного оборудования с исследуемыми ВС. Различные рефлектометрические подходы измерения поляризационных характеристик световодов предполагают ввод поляризованного излучения в световод под разными углами к оптической оси – от двух или трех углов, по измерениям на которых определяются параметры перекачки энергии из одной плоскости поляризации в другую, до сканирования по углам с заданным разрешением [4]. Во всех случаях от исследователя требуется многократная юстировка соединения, требующая контроля состояния поляризации при помощи измерителя поляризационной экстинкции (экстинометра). Визуальный контроль по индикатору экстинометра должен сопровождаться также визуальным контролем соосности сердцевин стыкуемых ВС, что достаточно трудоемко и неудобно. Предлагается автоматизировать процесс при помощи моторизованных управляемых компьютером микроподвижек следующим образом:

1) персональный компьютер инженера-исследователя (ПК) дает команду микроподвижкам на юстировку;

2) команда ПК микроподвижкам на поворот ВС выходного пигтейла измерительного оборудования на угол $\Delta\varphi$ относительно оптической оси;

3) экстинометр отсылает в режиме реального времени данные об угле ввода поляризованного излучения в исследуемый ВС;

4) если выбран режим сканирования по всем углам, результат сохраняется и поступает в модуль обработки. Если выбран режим поиска ранее заданных углов, переход к п. 3 до нахождения угла (также с последующей отсылкой данных в модуль обработки).

Модуль обработки представляет центральную программную систему исследования рефлектометрических данных. Расширяемая система также разработана на языке высокого уровня. Система позволяет:

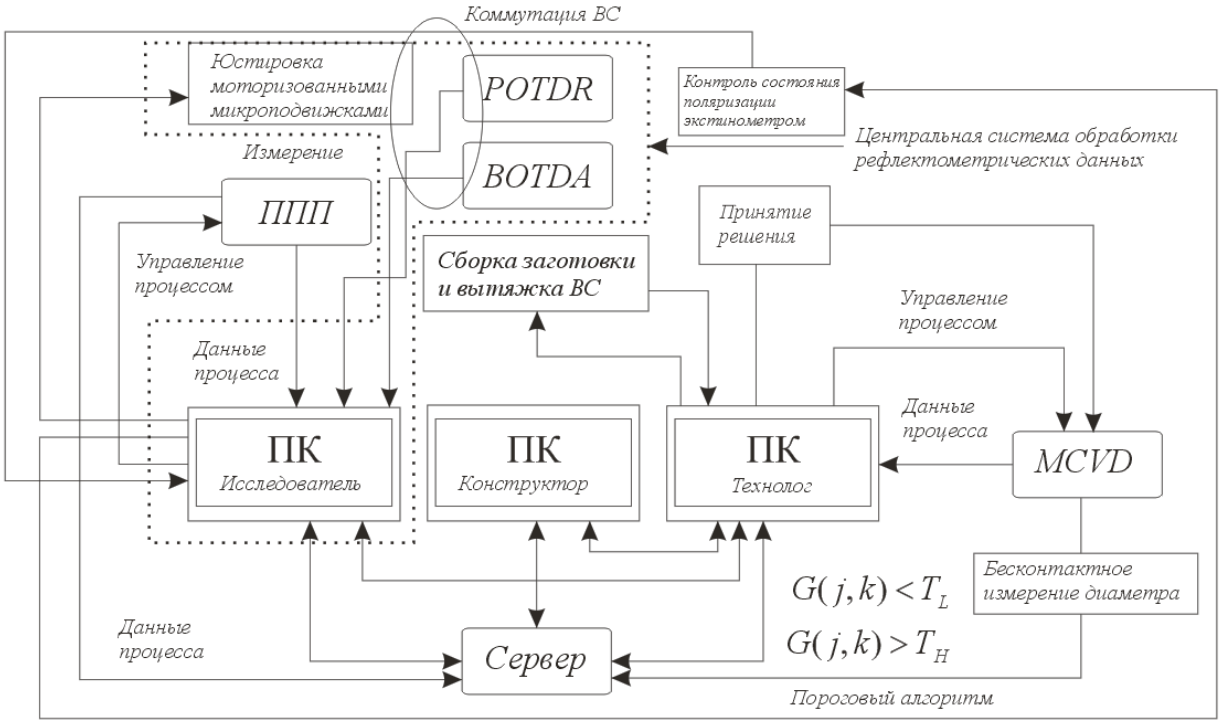


Рис. 2. Автоматизация на этапах производства ВС «Панда»

1. Снимать рефлектограмму длинного куска ВС после вытяжки и исследовать ее методами цифровой обработки сигнала. Волоконный световод специального применения после вытяжки часто разматывается на короткие длины для поставки производителю датчиков. Способ деления вытянутого световода на отрезки определяют по рефлектограмме. Чем больше негодных участков ВС получится отбраковать на этапе рефлектометрии, тем меньше лишних дальнейших операций контроля будет осуществлено. Применение методов цифровой обработки сигнала, описанных в [4, 5], а также совместный корреляционный анализ рефлектограмм Рэлея и Бриллюэна, данных с башни вытяжки ВС позволяют не только локализовать неоднородности, но и корректировать технологические процессы.

2. Автоматизировать получение, передачу, преобразование и сохранение данных рефлектометрических измерений.

Схематичное изображение мер автоматизации на этапах производства и исследования характеристик специальных анизотропных волоконных световодов типа «Панда» представлено на рис. 2.

Элемент «Принятие решения», изображенный на рис. 3, может быть автоматизирован с помощью специального алгоритма, основанного на статистических данных, а меры автоматизации на других этапах призваны ускорить принятие решения технологом, а также повысить его вер-

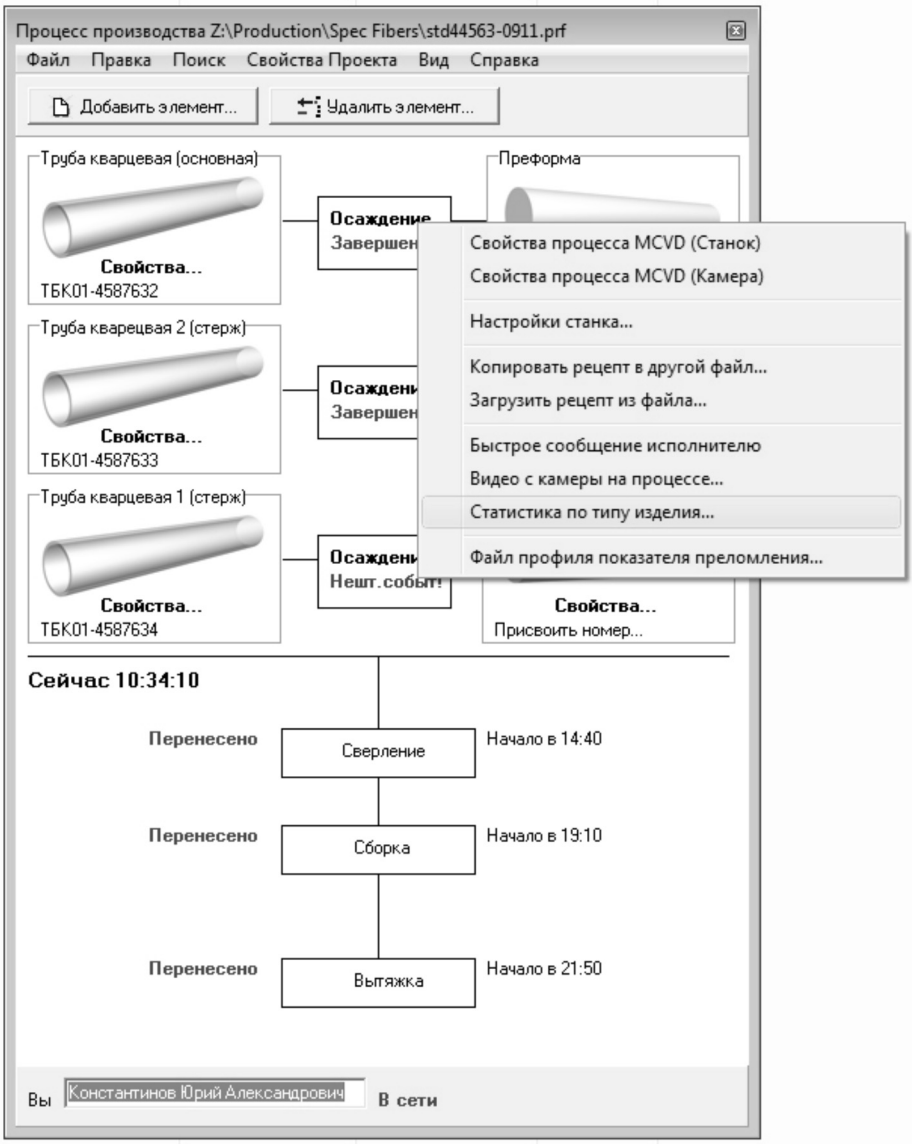


Рис. 3. Общая система управления и мониторинга

ность. Ряд четких рекомендаций, касающихся в основном подтверждения или отклонения того или иного действия, предложенного системой, может однозначно определить действия технолога на этапе принятия решения. В таком случае трактовку большинства параметров, полученных в ходе процесса или исследования, целесообразно осуществлять пороговыми алгоритмами. Например, для сведения операции определения «равномерности» рефлектограммы к применению порогового алгоритма в систему введена возможность взятия производной по длине.

Описываемая система призвана также решить некоторые задачи, поставленные в [6]. Единая программа, позволяющая получать данные и по изготавливаемым в данный момент комплектующим заготовки («сырые» данные процесса, видеомониторинг, короткие сообщения), и обработанные встраиваемыми модулями, а также результаты измерений (см. рис. 3).

Таким образом, применение описанной системы позволяет уменьшить время производственного цикла продукции, свести количество и время рутинных операций к минимуму. На момент написания статьи все встраиваемые модули работали как автономные приложения и как расширения для разрабатываемой системы. Практическую значимость предложенной системы можно будет оценить после полной отладки, запуска и продолжительной эксплуатации на производстве волоконных световодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Константинов, Ю.А.** Телевизионная система измерения размеров заготовки волоконных световодов в ходе процесса химического парофазного осаждения [Текст] / Ю.А. Константинов, И.И. Крюков, М.М. Поскребышев, Н.А. Харламова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –№ 6 (113). –155 с.

2. **Alam, M.** Small form-factor PANDA type HiBifiber for sensing applications [Text] / M.Alam, D.Guertin, J.Farroni [et al.] // In Proc.SPIE. –2003. –Vol.5272.

3. **Hartog, A.H.** Polarization measurements on monomode fibers using optical domain reflectometry [Text] / A.H. Hartog, D.N. Payne, A.J. Conduit // IEEE Proc. –1981. –Vol. 128. –Pt.H. –№ 3. –P.168–170.

4. **Константинов, Ю.А.** Поляризационная рефлектометрия анизотропных волоконных световодов [Текст] / Ю.А. Константинов, И.И. Крюков, В.П. Первадчук, А.Ю. Торошин // Квант. Электроника. –2009. –№ 39 (11). –С. 1068–1070.

5. **Константинов, Ю.А.** Разработка модифицированного корреляционного метода локализации дефектов в волоконных световодах [Текст] / Ю.А. Константинов, Т.В. Мазунина // Тр. ВКВО 2011.

6. **Крюков, И.И.** Автоматизация и управление процессами проектирования и производства специальных кварцевых оптических волокон: Дисс. … канд. техн. наук [Текст] / И.И. Крюков. –Пермь, 2006. – 123 с.

УДК 004.8.032.26, 681.513.8

Е.Н. Бендерская, К.В. Никитин

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ АКТИВНОСТИ МОЗГА И БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Развитие перспективных систем распознавания на нейронных сетях (НС), как и развитие теории НС, ведутся в двух основных направлениях:

совершенствование уже хорошо зарекомендовавших себя на практике подходов к решению определенного класса задач;

разработка новых концепций, базирующихся на последних открытиях и достижениях из области нейрофизиологии, когнитивной психологии, а также других наук, связанных с изучением механизмов мышления и работы естественного интеллекта при решении задач распознавания образов.

Второе направление включает в себя рекуррентные НС (РНС) с неустойчивой динамикой, входящие в состав основных моделей из новой парадигмы «резервуарных» вычислений [1, 2], которые в свою очередь являются биоинспирированными вычислениями, заимствующими прин-

ципы работы всего головного мозга как системы, а не только ее составных частей.

Актуальная задача моделирования нейронной динамики мозга, относящаяся в большей степени к биологическому направлению, и другая актуальная задача, относящаяся к техническому направлению, – распознавание сложных динамических образов в изменяющейся окружающей среде с минимальным набором априорной информации (т. е. сопоставимая с возможностями интеллектуального распознавания человеком), приводят к необходимости развития одноного и того же аппарата – РНС.

Проведенные исследования возможностей РНС [3, 4] показали не только их большой потенциал, но и вскрыли ряд проблем, связанных с их настройкой и использованием, что приводит к необходимости проведения дополнительного сопоставления этого класса НС с другими подходами, а также к пересмотру требований к системе моделирования. В частности, включение дополнительных функциональных возможностей в оценке динамических свойств РНС.

Статья знакомит с некоторыми результатами работы, цель которой – разработка системы моделирования, поддерживающей создание РНС с биологически правдоподобными нейронами, и позволяющей проводить оценку динамических режимов работы РНС.

Система распознавания на основе машины неустойчивых состояний и разработанная программная среда для ее моделирования подробно рассмотрены в [3, 4]. Как показало проведенное ранее предварительное исследование, наиболее существенными в системе распознавания на основе РНС являются параметры, связанные с формированием структуры собственно НС, хотя и параметры наблюдателя также влияют на качество решения задачи распознавания. Поэтому для синтеза методики направленного выбора параметров РНС предлагается отключить «наблюдатель», который является статической системой и требует специального преобразования выходных сигналов с РНС в форму, подходящую для его работы, и исследовать отдельно динамику РНС.

Возможность распознавания сложных (в т. ч. случайных) образов на основе РНС с импульсными нейронами основывается на том, что при функционировании такой системы она находится в состоянии между порядком и хаосом. Динамика, связанная с крайними состояниями системы, такими, как упорядоченное функционирование, нежелательна, т. к. при этом ограничиваются запоминающие и, следовательно, распознающие возможности РНС (система становится близка к НС Хопфилда со всеми присущими ей недостатками), впрочем, и работа в турбулентном, полностью неупорядоченном режиме также нежелательна, т. к. в этом случае правильное «узнавание» требует бесконечного времени, необходимого для преодоления порога «узнавания» и набора усредненной статистики повторения образа. Основной параметр, влияющий на образование структур в динамике системы – связность элементов системы. При этом в каждое отдельное состояние вносят вклад как возбуждающие, так и тормозящие связи нейронов, что соответствует диссипативным и инерционным связям. Поэтому для исследования возможных режимов в РНС предлагается перейти к анализу только собственных выходных значений ее нейронов и показателей, которые позволят однозначно охарактеризовать процессы собственной динамики и динамического отклика, накладываемого на эту динамику посредством воздействия на входные нейроны РНС входного образа.

При этом помимо собственной связности, характеризующей некоторый внутренний образ, хранящийся в системе, особое внимание предполагается уделить коэффициентам, отражающим диссипативные и инерционные процессы в динамике работы сети. Кроме того, необходимо определить роль динамических характеристик отдельных биоподобных нейронов в формировании общей коллективной динамики.

Динамические импульсные модели нейронов

Статические (основаны на частотном принципе) и простые динамические модели нейронов только приближенно описывают свойства реальных нейронов, а нередко и просто являются абстрактными, не привязанными к реальному нейрону. Поэтому параллельно разрабатывались другие, реалистичные модели биологического нейрона. В них основной упор сделан на следующие моменты:

моделирование импульсной динамики, наблюдающейся в биологических нейронах (как на феноменологическом уровне, так и на уровне гипотез с привлечением исследований нейробиологов);

моделирование сложных пространственных конфигураций биологического нейрона (дендритные деревья).

Основная реалистичная модель биологического нейрона, являющаяся базой для большинства других моделей, – модель Ходжкина–Хаксли (Hodgkin, Huxley, 1952):

$$\begin{cases} C\dfrac{dv}{dt} = -g_{\mathrm{Na}} m^3 h(v - v_{\mathrm{Na}}) - \\ -g_{\mathrm{K}} n^4 (v - v_{\mathrm{K}}) - \\ -g_{\mathrm{L}}(v - v_{\mathrm{L}}) + I_{\mathrm{ext}} \\ \dfrac{dm}{dt} = \dfrac{m_\infty(v) - m}{\tau_m(v)} \\ \dfrac{dh}{dt} = \dfrac{h_\infty(v) - h}{\tau_h(v)} \\ \dfrac{dn}{dt} = \dfrac{n_\infty(v) - n}{\tau_n(v)} \end{cases},$$

где v – потенциал мембраны в мВ; C – емкость на единицу площади, см^2; I_{ext} – внешний ток на единицу площади, мкА; g_{Na}, g_{K}, g_{L} – проводимости каналов на единицу площади в мСм/см^2; m, n, h – так называемые «вентильные» переменные, отвечающие за открытие ионных каналов; t – время, мс; $m_\infty(v)$, $n_\infty(v)$, $h_\infty(v)$ – зависимость установившегося значения соответствующей вентильной переменной m, n, h от потенциала v; $\tau_m(v)$, $\tau_n(v)$, $\tau_h(v)$ – зависимость постоянной времени соответствующей вентильной переменной m, n, h от потенциала v; v_{Na}, v_{K}, v_{L} – реверсные потенциалы (потенциалы Нернста) ионов Na, K и утечки.

Эта наиболее подробная и известная модель биологического нейрона описывает динамику нейрона в терминах работы ионных каналов Na, K, Ca и позволяет продемонстрировать широкий спектр различных вариантов поведения, наблюдаемых в реальных нейронах. Модель Ходжкина–Хаксли может быть рассмотрена как с обычными дендритами, так и со сложными распределенными в пространстве дендритными деревьями, что делает ее универсальной в смысле моделирования разных типов биологических нейронов.

В связи с тем, что первая и достаточно детализированная модель нейрона получена давно, все потребности в моделировании нейронной активности мозга она не покрывает, что отражается в дальнейшей разработке новых моделей. Основные модели биологического нейрона:

модель Коннора, Вальтера, МакКоуна (Connor, Walter, McKown, 1977) – модель Ходжкина–Хаксли с добавлением двух новые переменных (итого порядок равен 6);

модель Морриса-Лекара (Morris, Lecar, 1981) – упрощение модели Ходжкина–Хаксли с 4 до 2 порядка;

модели Чея (Chay, 1985, 1990), похожие на модель Ходжкина–Хаксли, но имеющие порядок 3;

модель Головаща (Golovasch, 1990) – модель нейрона 13 порядка;

модель Голомба, Гукенгеймера, Гуэрона (Golomb, Guckenheimer, Gueron, 1993) – упрощенная модель Головоща 7 порядка.

Помимо перечисленных реалистичных моделей было предложено несколько упрощенных феноменологических моделей импульсных нейронов. Их цель – упростить понимание сути работы импульсного нейрона, а также ускорить процесс моделирования НС из импульсных нейронов. Некоторые параметры в этих моделях уже могут не иметь конкретного физического смысла. Основные феноменологические модели:

модель «Интегрирование и высвечивание (возбуждение)», (Integrate-and-fire, 1907) – наиболее известная и популярная феноменологическая, вытекающая из аддитивной модели; является предельно упрощенным аналогом биологического нейрона;

модель Фитцху–Нагумо (Fitz Hugh, Nagumo, 1962) – модель 2 порядка, являющаяся упрощением модели Ходжкина–Хаксли; широко используется в реакционно-диффузионных системах для моделирования распространения волн в возбудимой среде; эта модель прояснила некоторые свойства, присущие модели (1) с помощью метода фазового пространства;

модель Хиндмарш–Роуз (Hindmarsh, Rose, 1984) – модель 3 порядка, позволяющая моделировать хаотическую импульсную активность;

модель Ижикевича (Izhikevich, 2003) – современная модель 2 порядка, позволяющая моделировать практически все наиболее характерные, из известных на сегодняшний день, особенности импульсной активности, присущие реальным нейронам; для этого необходимо соответствующим образом настроить ее параметры; при построении модели автор активно использовал метод фазового пространства.

Такое разнообразие моделей объясняется поиском подходящего варианта модели элемента для воспроизведения, с одной стороны, большого

числа особенностей функционирования биологического нейрона, а, с другой, – потребностью обеспечения приемлемой для моделирования сложности, учитывая необходимость моделирования взаимодействия огромного числа таких элементов. В вопросе выбора уровня упрощения – детализации пока единого подхода нет. Рассмотрим, какие особенности характеризуют рекуррентные нейронные сети, в которых предполагается в качестве основного элемента использовать биологически реалистические нейроны.

РНС как динамическая система

Можно описать следующие отличительные особенности РНС как динамической системы:

РНС интегрирует входную информацию, т. е. учитывает предысторию входных сигналов и тем самым реализует кратковременную память;

РНС обладает сложным поведением: возможны различные режимы функционирования – пространственно-временной хаос, формирование образов, блуждающие и спиральные волны, турбулентность, при этом могут быть переключения между режимами.

Первое свойство активно используется для решения РНС задач распознавания динамических, изменяющихся во времени образов. РНС в ответ на изменяющуюся входную последовательность может перейти в уникальное состояние, которое будет зависеть от всей последовательности.

Второе свойство является предметом для изучения. Различные режимы работы РНС исследуются и делаются попытки приложить их для решения различных задач.

Динамика РНС зависит как от ее структуры, так и от свойств составляющих ее элементов. При этом возможны случаи, когда РНС из устойчивых нейронов при определенной структуре неустойчива и наоборот – когда РНС из неустойчивых, хаотических элементов является устойчивой. Однако при исследовании устойчивых режимов нейронная сеть, как правило, формируется из устойчивых элементов, при исследовании колебательных режимов – из так называемых *осцилляторов* – колебательных элементов, и, наконец, при исследовании хаотических режимов – из хаотических осцилляторов.

Далее рассмотрим основные режимы работы РНС с точки зрения ее динамики:

устойчивый режим – динамика РНС строго подчиняется некоторому закону и за конечное время РНС сходится к устойчивому состоянию – аттрактору. В данном режиме при изменении входного сигнала возможны переходы системы из одного состояния в другое;

колебательный режим – РНС переходит из одного состояние в другое за определенное число шагов (предельный цикл). В данном режиме, с одной стороны, можно считать что предельный цикл кодирует некоторую информацию, а, с другой, – что происходят колебания, в фазовых соотношениях которых передается информация;

неустойчивый, хаотический режим – изменения состояния РНС носят непредсказуемый характер, и со стороны случайного наблюдателя процесс может показаться стохастическим. С точки зрения физики процесса, система в хаотическом режиме «уходит в себя» и может слабо реагировать на входные сигналы (аналогия – задумавшийся человек практически не реагирует на то, что творится вокруг). Количество информации, содержащееся в состоянии РНС большое, но извлечь эту информацию сложно. Во многих научных лабораториях исследуется поведение динамических систем в хаотических режимах и предлагаются различные варианты интерпретации этой динамики.

Подходы к исследованию РНС и ее использованию

На данный момент не существует общей стратегии для изучения динамики РНС [5]. Также пока не разработано и подходов для аналитического решения системы, описывающей импульсную РНС, и формальных признаков, определяющих режим функционирования. Связано это с тем, что этот класс сетей предполагает наличие большого числа динамических элементов и их неоднородную связанность. Поэтому общепринятым является применение методов моделирования.

Моделирование метастабильных состояний, фазовых переходов и пространственно-временных соотношений нейронной активности позволит расширить возможности кодирования и обработки информации [6–9].

Проведенный анализ современных исследований и тенденций в области РНС с учетом результатов проведенных ранее исследований на разработанной модели системы распознавания [3, 4], позволили сформулировать дополнитель-

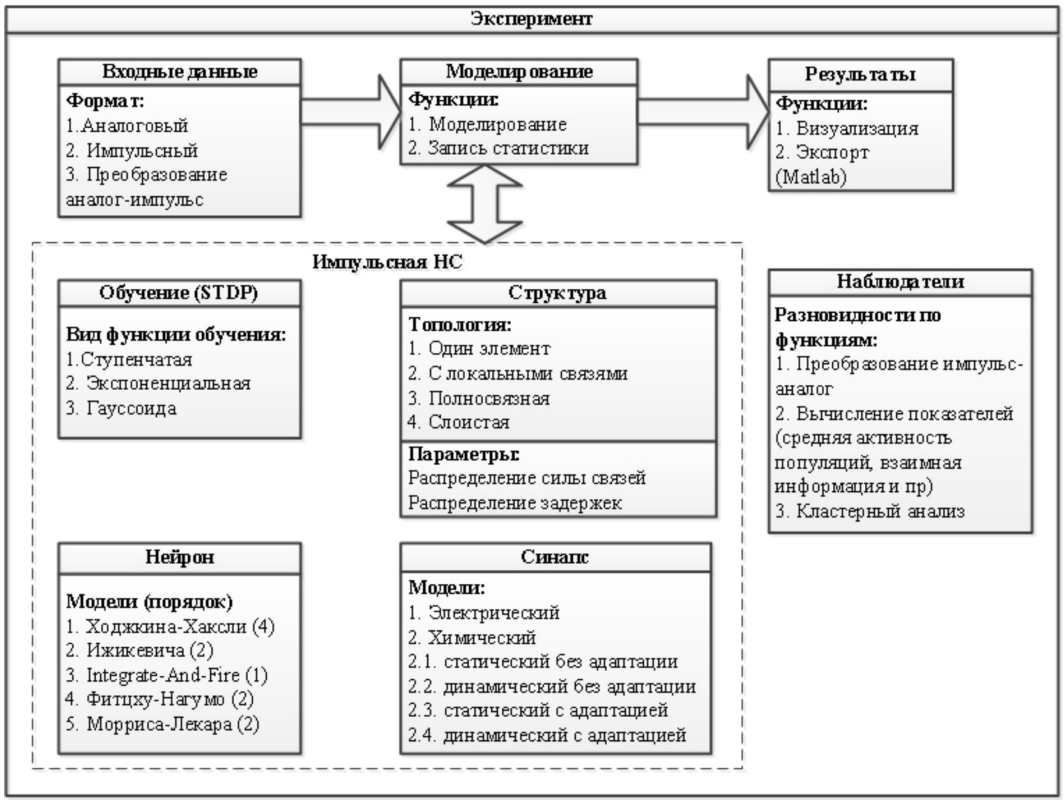


Рис. 1. Упрощенная схема иерархии объектов в программной среде моделирования импульсных рекуррентных нейронных сетей

ные требования и реализовать необходимые компоненты в развитии системы моделирования РНС. Основные изменения затронули:

базис доступных моделей биологических нейронов;

возможные варианты задания синаптических связей и включение возможности задания задержек при передачи сигналов от нейрона к нейрону;

способы визуализации динамики выходов нейронов и сбор статистики с возможностью дальнейшей обработки внешними средствами;

возможность включения в модель шумовых составляющих для каждого нейрона как случайных процессов за счет изменения подхода к решению системы дифференциальных уравнений (вместо событийного подхода, и аналитического решения, ограничивающего случайные составляющие фиксированными значениями, численное решение через интегрирование с заданным шагом).

Разработанная среда моделирования импульсных РНС включает в себя возможность:

моделирования составляющих импульсных РНС (синапсов, нейронов), алгоритмов обучения и импульсного кодирования;

исследования влияния синапсов (статических и динамических с возможностью обучения) на обработку входной информации нейроном;

исследования нейронных сетей из импульсных нейронов;

моделирования резервуарных вычислений с выделением основных свойств: разделения, аппроксимации, затухающей памяти;

исследования режимов синхронизации и получения характеристик решения задачи сегментации.

Упрощенная схема иерархии объектов в программной среде моделирования импульсных рекуррентных нейронных сетей представлена на рис. 1. На верхнем уровне иерархии находится эксперимент. После его запуска извлекаются входные данные, происходит моделирование импульсной РНС и формируются результаты. При моделировании импульсной РНС используется информации о ее структуре, параметрах обучения, а также о подключенных наблюдателях (считывающих модулей). В свою очередь структура РНС содержит данные о модели каждого нейрона и си-

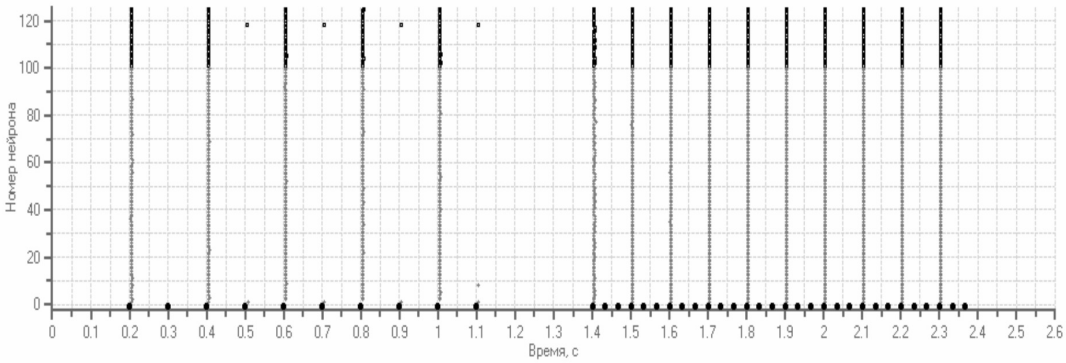


Рис. 2. Выходная динамика нейронов РНС – один кластер

напса. Также для элементов иерархии указаны их возможные типы (разновидности) и функции.

Биоинспирированные вычисления и вычисления в РНС могут быть разделены на следующие классы: с точечными аттракторами, с терминальными аттракторами, аттракторами типа «предельный цикл» и хаотическими аттракторами. Случай с хаотическим аттрактором также может быть назван «неаттракторным», т. к. система не приходит к некоторому устойчивому в классическом смысле состоянию [2]. РНС «неаттракторного» типа реализуют идею резервуарных вычислений [1].

Разработанная среда моделирования импульсных РНС позволяет проводить моделирование РНС всех классов. В ней было проведено экспериментальное исследование роли связности структур рекуррентной сети в образовании кластеров активности при различных динамических режимах. На рис. 2 и 3 представлена динамика выходов нейронов РНС (выходы возбуждающих нейронов представлены серыми точками, а подавляющих – черными точками) при различных импульсных входных воздействиях, изображенных в отрицательной области по оси ординат, и образование разных динамических режимов. На рис. 2 показан режим упорядоченный [6] с образованием одного кластера активности (общее число нейронов 125 и параметр связности РНС равен единице), при этом динамика сети затухает сразу же после завершения поступления входных образов.

На рис. 3 представлен пример режима с образованием нескольких кластеров, характеризующихся сложной динамикой (общее число нейронов 125, параметр связности РНС равен трем), незатухающей и после прекращения действия на входе РНС входных образов. Также на этих рисунках легко прослеживается наличие ритмов активности, сопоставимых с ритмами, присущими биологическим нейронным сетям [6, 7].

Анализ результатов экспериментального исследования также показал, что при определенном сочетании параметров связности и параметров синаптической пластичности нейронов возможно образование особых режимов, нежелательных для решения задачи распознавания. Это согласуется с известными результатами об особых типах синхронизации, возникающих в РНС с хаотической динамикой [8, 9].

Кроме того, можно утверждать, что исполь-

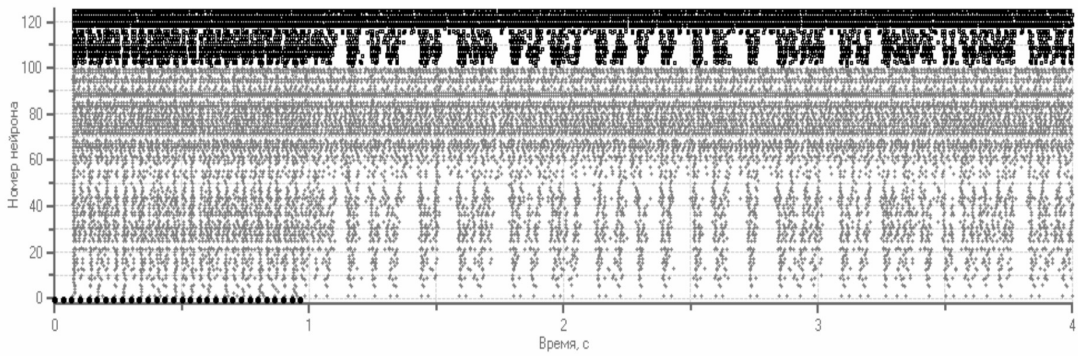


Рис. 3. Выходная динамика нейронов РНС – несколько кластеров

зование характеристик, традиционно применяемых для оценки динамических свойств систем и для выявления образования кластеров активности (таких, как матрицы информации и энтропии Шеннона, Гуменюка) не позволяют произвести правильное распознавание на всем диапазоне возможных значений коэффициентов модели (выявлены предпочтительные диапазоны значений), что говорит о необходимости неслучайного назначения параметров РНС.

Разработанная программная среда моделирования импульсных рекуррентных нейронных сетей позволяет проводить исследования по определению особенностей различных моделей биологических нейронов в составе сложных динамических сетей, выявлению значимости синаптических связей различной природы при запоминании и распознавании образов в осцилляторной динамике, а также наблюдать процессы изменения паттернов активности при воздействии на НС входных сигналов. Программная среда может использоваться как для разработки современных систем распознавания образов, так и для исследования принципов обработки информации в нейронных структурах при моделировании нейронной активности мозга.

Полученные результаты моделирования РНС подтверждают гипотезы о хаотическом поиске [6] как одном из режимов, при котором может осуществляться обработка информации.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на выявление условий возникновения и поддержания динамических режимов РНС, позволяющих решать сложные задачи распознавания динамических образов, а также на поиск адекватных способов автоматизированной обработки и интерпретации динамики выходов РНС. Разработанная программная система позволяет проводить подобные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Verstraeten, D.** An experimental unification of reservoir computing methods [Text] / D. Verstraeten, B. Schrauwen, M. Haene // Neural Networks. –2007. –Vol. 20. –P. 391–403.

2. **Maass, W.** Real-time computing without stable states: a new framework for neural computation based on perturbations [Text] / W. Maass, T. Natschlaeger //Neural Computations. –2002. –Vol. 14(11). –P. 2531–2560.

3. **Бендерская, Е.Н.** Исследование возможностей рекуррентных нейронных сетей с неустойчивой динамикой для решения задач классификации [Текст] / Е.Н. Бендерская, К.В. Никитин // Науч. сессия МИФИ-2007. IX Всерос. науч.-техн. конф. Нейроинформатика-2007: Сб. науч. тр. IX; В 3-х ч.; Ч. 3. –М.: Изд-во МИФИ, 2007. –С. 191–198.

4. **Никитин, К.В.** Новый подход к применению рекуррентных нейронных сетей для решения задач распознавания образов [Текст] / К.В.Никитин, Е.Н. Бендерская // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2007. –№ 4. –Т. 2. – С. 85–92.

5. **Cessac, B.** From neuron to neural networks dynamics [Text] / B. Cessac, M. Samuelides // Eur. Phys. J. Special Topics. –2007.– № 142. –P.7–88.

6. **Kaneko, K.** Clustering, Coding, Switching, Hierarchical Ordering and Control in a Network of Chaotic Elements [Text] / K. Kaneko // Physica D: Nonlinear Phenomena. –1990. – Vol. 41. –Iss. 2. –P.137–172.

7. **Борисюк, Г.Н**. Модели динамики нейронной активности при обработке информации мозгом – итоги «десятилетия» [Текст] / Г.Н. Борисюк, Р.М. Борисюк, Я.Б. Казанович [и др.] // УФН. –2002. –№ 172. –С.1189–1214.

8. **Benderskaya, E.N.** Fragmentary Synchronization in Chaotic Neural Network and Data Mining [Text] / E.N.Benderskaya, S.V. Zhukova // Lecture Notes in Computer Science. LNAI. –Springer, 2009. –Vol. 5572. –P. 319–326.

9. **Benderskaya, E.N.** Self-organized Clustering and Classification: A Unified Approach via Distributed Chaotic Computing [Text] / E.N. Benderskaya, S.V. Zhukova // Advances in Intelligent and Soft Computing. –Springer, 2011. –Vol. 91. –P.423–431.

УДК 621.396

Р.И. Романов, А.С. Коротков

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СТАТИЧЕСКОЙ ЗАПОМИНАЮЩЕЙ ЯЧЕЙКИ С ПОНИЖЕННОЙ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТЬЮ

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) является одним из основных компонентов цифровых устройств и предназначено для хранения и последующего быстрого воспроизведения данных в произвольном порядке. В самом общем виде ОЗУ состоит из накопителя, хранящего информацию, и схем обслуживания, обеспечивающих функционирование накопителя и обмен информацией с периферией. Накопитель состоит из однотипных структур, называемых *запоминающими ячейками* (ЗЯ) и хранящих минимальную отдельную единицу информации. В мобильных системах ОЗУ должно обеспечивать требуемое время доступа при заданной емкости и потребляемой мощности.

Наибольшим быстродействием обладают статические ОЗУ, запоминающие ячейки которых построены на основе триггера [1]. При использовании МОП-технологии с проектной нормой 180 нм при стандартном напряжении питания 1,8 В данные ЗЯ имеют следующие типовые параметры [2, 3]: в зависимости от соотношения размеров транзисторов, запас статической помехоустойчивости (Static Noise Margin, SNM) изменяется от 200 до 400 мВ; порог переключения в режиме записи (Write Margin, WRM) – от 0,5 до 1 В; разрядный ток ячейки (I_{cell}) – от 70 до 100 мкА. При переходе к субмикронным проектным нормам увеличивается технологический разброс параметров МОП-транзисторов, что приводит к уменьшению SNM и увеличению вероятности битовых ошибок в накопителе. В данной статье приводятся результаты исследования ЗЯ с произвольным доступом с двумя адресными входами, обладающей повышенным значением SNM и низкой потребляемой мощностью, схемное решение которой предложено и защищено в [4].

Обобщенная структура и параметры запоминающей ячейки

Элементы, входящие в состав любой ЗЯ с произвольным доступом, можно подразделить на два типа: обеспечивающие хранение информации (в случае статической ЗЯ – это триггер) и обеспечивающие доступ к информации со стороны периферийных устройств (в рассматриваемом случае – это ключи выборки и схема управления). Запоминающие ячейки входят в состав накопителя, который включает в себя также адресные шины (АШ), обеспечивающие управление требуемыми группами ЗЯ, разрядные шины (РШ), обеспечивающие передачу информации, и шины питания. Соответственно, ключи выборки служат для передачи сигналов между триггером и РШ при операциях записи и чтения, а схема управления служит для изменения состояния ключей в зависимости от сигналов, поступивших с АШ.

Помехоустойчивость накопителя определяется величиной защитного интервала между логическими уровнями информационных сигналов и зависит от следующих параметров ЗЯ: SNM, WRM и I_{cell}. Обобщая формулировки, приведенные в [1, 7, 12], определим перечисленные параметры следующим образом.

1. SNM – это половина разности потенциалов, подаваемых на входы триггера в противоположных фазах, при которой триггер изменяет свое состояние на противоположное. Если параметр равен нулю, триггер неустойчив. При расчете схемы SNM должен быть максимизирован в режимах чтения и хранения и не превосходить нуль в режиме записи. Необходимость обеспечения ненулевого запаса устойчивости в режимах чтения и хранения диктуется технологическим разбросом и температурными изменениями пороговых

напряжений и токов насыщения транзисторов, а также наличием перекрестных помех. Как правило, SNM выбирают таким, чтобы в наихудших условиях он превосходил уровень перекрестных помех.

2. WRM – это напряжение в узле подключения ЗЯ к РШ, при котором триггер меняет свое состояние. Чем меньше это напряжение отличается от напряжения предварительной установки РШ, тем выше быстродействие и меньше потребляемая мощность в режиме записи, что обусловлено наличием распределенных емкости и сопротивления РШ. Существует, однако, ограничение снизу на рассмотренное отличие, определяемое температурной и технологической нестабильностью схемы, а также перекрестными помехами. Как правило, разницу между WRM и напряжением предварительной установки выбирают порядка 0,4–0,7 от разницы высокого и низкого логических уровней.

3. Разрядный ток ячейки – это ток, втекающий в ЗЯ с РШ в режиме чтения. Данный параметр определяет скорость разряда РШ, от которой зависит амплитуда полезного сигнала на РШ при фиксированном времени операции чтения. Минимально допустимое значение амплитуды определяется уровнем перекрестных помех и технологическим разбросом параметров элементов усилителя считывания.

Способы уменьшения потребляемой мощности

Потребляемая мощность устройств, выполненных по МОП-технологии, в статическом режиме много меньше, чем в динамическом (в активном). Например, приведенные в [5] результаты для статического ОЗУ емкостью 32 Кб, выполненного по МОП-технологии с разрешением 90 нм, показывают, что статическая потребляемая мощность накопителя составляет 1,44 мкВт, а динамическая – 12 мВт при тактовой частоте 100 МГц. Поэтому в данной статье рассматриваются способы уменьшения потребляемой мощности для активного режима работы ОЗУ.

Как показывает моделирование, основная часть потребляемой накопителем мощности приходится на заряд распределенной емкости шин, величина которой зависит от типа технологии. Так, для рассматриваемой далее МОП-технологии с проектной нормой 180 нм емкость составляет доли пФ [6]. Предлагается выделить три подхода к снижению потребляемой мощности.

1. Уменьшение значения распределенной емкости, достигаемое оптимизацией топологии ЗЯ. Минимальные значения паразитных емкостей определяются технологическими параметрами.

2. Уменьшение амплитуды сигнала на распределенной емкости, достигаемое уменьшением зарядного тока или длительности процесса заряда шин. Данный подход требует использования ЗЯ с меньшей разницей между порогом переключения и предварительным уровнем заряда шин как по информационным, так и по адресным входам, а также более чувствительного усилителя считывания. Минимальная амплитуда полезного сигнала на шинах определяется уровнем перекрестных помех, технологическим разбросом и температурными изменениями параметров транзисторов.

3. Уменьшение числа заряжаемых емкостей, достигаемое отключением неиспользуемых для передачи информации шин. При этом осуществляется деление накопителя на субмассивы [7] или применяется двухкоординатная выборка [8].

В первом случае в накопителе ОЗУ используется несколько субмассивов с индивидуальными схемами обслуживания, причем обмен информацией может вестись одновременно только с одним субмассивом, остальные находятся в режиме хранения. Таким образом, большая часть неиспользуемых при обмене информацией элементов ОЗУ потребляют мощность, обусловленную исключительно токами утечки. При этом не обеспечивается уменьшение числа шин, не использующихся для обмена информацией, но участвующих в процессе перезаряда внутри отдельно взятого накопителя.

Поэтому наряду с делением на субмассивы, целесообразно использовать способ двухкоординатной выборки, заключающийся в управлении выборкой ЗЯ как по строкам, так и по столбцам. Если в обычном накопителе по сигналу АШ изменяется потенциал во всех парах РШ, то использование дополнительных шин столбцов (ШС) позволяет изменять потенциал только в парах РШ, передающих информацию на шину данных (ШД). Если предположить, что при чтении на перезаряд всех шин тратится одинаковая мощность P_i, то без использования двухкоординатной выборки потребляемая накопителем мощность будет равна $P_1 = (n_1 + 1)P_i$, где n_1 – число пар РШ, а единице соответствует потребление мощности

АШ. При двухкоординатной выборке потребляемая мощность равна $P_2 = (n_2 + 1)P_i$, где n_2 – число разрядов ШД, а коэффициенту 2 соответствует потребление мощности дополнительными ШС и дифференциальной АШ. Таким образом, энергетический выигрыш в режиме чтения составит:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1 + 1}{2(n_2 + 1)}. \quad (1)$$

Способы увеличения помехоустойчивости триггера

Триггер ЗЯ в общем случае представляет нелинейный источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН) с ненулевым выходным импедансом, нагруженный на ключ выборки. Как правило, ИНУН – это пара последовательно соединенных инверторов. При симметричном триггере один из открытых ключей выборки вносится в состав источника. Узел, к которому присоединены ключ и выход ИНУН, является управляющим для ИНУН. Таким образом, цепь положительной обратной связи (ПОС) представляет делитель напряжения, образованный выходными нелинейными импедансами ИНУН и ключа выборки.

В связи с наличием у передаточной характеристики ИНУН двух областей насыщения, в которых коэффициент петлевого усиления K_y системы меньше единицы, имеются два устойчивых логических состояния триггера. Также для потенциала управляющего узла можно выделить области, в которых триггер либо устойчив ($K_y < 1$), либо меняет свое состояние на противоположное ($K_y > 1$). Следовательно, в режиме чтения потенциал управляющего узла должен находиться гарантированно в области устойчивости, а в режиме записи – в области неустойчивости.

В шеститранзисторном (6Т) триггере [7], представляющем основу для построения большинства современных статических ЗЯ, смена состояния производится аддитивным воздействием на цепь ПОС путем изменения потенциала входного узла, к которому через импеданс ключа выборки подключен управляющий узел. В режиме чтения потенциал одной из РШ изменяется за счет протекания тока через ключ выборки и один из инверторов. В то же время, в управляющем узле, соответствующем выходу инвертора с низким уровнем, происходит увеличение потенциала, что может привести к попаданию в область неустойчивости.

Таким образом, для увеличения SNM следует увеличивать отношение ширины *n*-канальных транзисторов инверторов (драйверов) к ширине транзисторов ключей выборки, получившее название «коэффициент ячейки» (CR) [7], поскольку отношение падений напряжения на данных транзисторах обратно пропорционально отношению их ширин. Для увеличения WRM следует уменьшать отношение ширины нагрузочного *p*-канального транзистора к ширине транзистора ключа выборки, получившее название «коэффициент нагрузки» (PR).

Следовательно, *n*-канальные транзисторы инверторов выбираются шире *p*-канальных в CR/PR раз, при этом, чем больше технологический разброс параметров транзисторов, тем больший запас по величинам CR и 1/PR необходим для надежного функционирования триггера. Как правило, *p*-канальный транзистор инверторов выбирают минимальных размеров. Несмотря на это, для получения требуемых значений SNM и WRM приходится использовать *n*-канальные транзисторы инверторов значительной ширины, что резко увеличивает площадь кристалла ЗЯ.

Рассмотрим способы увеличения SNM, не приводящие к значительному увеличению площади:

1. Изменение управляющего напряжения ключей выборки [9]. Данный способ основан на уменьшении напряжения на активной АШ в режиме чтения и подаче номинального напряжения в режиме записи. В результате, в режиме чтения уменьшается проводимость транзисторов ключей выборки и увеличивается CR и SNM. В режиме записи уменьшается PR и увеличивается WRM. Основной недостаток данного подхода – чувствительность перечисленных параметров к разбросу пороговых напряжений транзисторов.

2. Использование отрицательного напряжения на РШ в режиме записи [9]. При этом ширина транзисторов выборки задается меньше, чем в предыдущем случае, что увеличивает CR и SNM. Для компенсации уменьшения WRM нулевой логический уровень на РШ выбирается отрицательным. Основной недостаток – увеличение уровня перекрестных помех и потребляемой мощности.

3. Управление напряжением питания триггера [9]. Ширина транзистора выборки задается аналогично предыдущему случаю. В режиме записи напряжение питания триггера занижается, что приводит к уменьшению проводимости

открытого *p*-канального транзистора триггера, уменьшению PR и увеличению WRM. Основной недостаток – использование двух источников питания.

4. Использование внешней разрядной цепи [9, 10]. К выходу триггера подключается затвор разрядного транзистора, соединенного последовательно с дополнительным транзистором выборки, к которому подключена дополнительная РШ чтения. Такое решение позволяет обеспечить необходимый ток считывания без уменьшения SNM. Основной недостаток – необходимость введения дополнительной пары транзисторов и шин.

5. Управление длительностью выборки [11]. В режиме чтения ключи выборки открываются на меньшее время, чем в режиме записи. В силу инерционности цепи ПОС, изменение напряжения на управляющем узле ИНУН в режиме чтения становится меньше, чем в режиме записи и, следовательно, увеличивается SNM. Основной недостаток – необходимость введения управляемого генератора импульсов.

Запоминающая ячейка с повышенной помехоустойчивостью

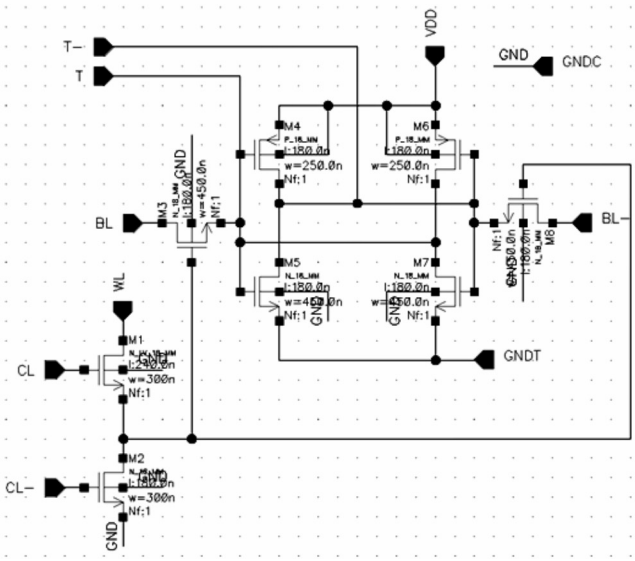
Для повышения помехоустойчивости в [4] предложен способ, отличный от способов, рассмотренных выше. Предлагается подключить истоки *n*-канальных МОП-транзисторов M5 и M7 из состава инверторов триггера к отдельной шине GNDT с повышенным, по сравнению с общей шиной GND, потенциалом (рис. 1). Увеличение SNM в режиме чтения достигается за счет уменьшения напряжения затвор-исток МОП-транзисторов ключей выборки M3 и M8, что приводит к увеличению их сопротивления в открытом состоянии. Одновременно увеличивается WRM за счет увеличения напряжения переключения инверторов. Увеличения площади ЗЯ при этом не происходит.

В состав исследуемой ЗЯ кроме триггера входит логический элемент «И», выполненный на двух *n*-канальных транзисторах M1 и M2 и реализующий двухкоординатную выборку для уменьшения потребляемой мощности.

Например, при построении ЗУ, содержащего восьмиразрядную ШД (n_2 = 8) и накопитель из шестидесяти четырех пар РШ (n_1 = 64), двухкоординатная выборка позволяет получить выигрыш $\eta = 3,5$ при полном разряде шин (1). При этом напряжение единичного логического уровня на затворах транзисторов выборки меньше, чем для остальной схемы, на величину порогового напряжения пропускающего транзистора M1 логического элемента. В схеме, предложенной в [8] (далее – схема Лиу-Чоу-Ляо), это приводило к увеличению SNM и уменьшению WRM. Применение дополнительной общей шины триггера в предложенной ЗЯ позволило увеличить SNM по сравнению со схемой Лиу-Чоу-Ляо и при этом избежать уменьшения WRM.

Результаты компьютерного моделирования

Для проверки эффективности предложенно-



CL-, CL - узлы шин столбцов
WL - узел шины слов
BL-, BL - узлы разрядных шин
VDD - узел шины питания
GND - узел общей шины ячейки
GNDT - узел общей шины триггера
T-, T - выходные узлы инверторов

M1 - пропускающий транзистор
M2 - разрядный транзистор
M3, M8 - транзисторы выборки
M4, M6 - нагрузочные транзисторы
M5, M7 - транзисторы драйвера

Рис. 1. Схема ячейки с повышенной помехоустойчивостью

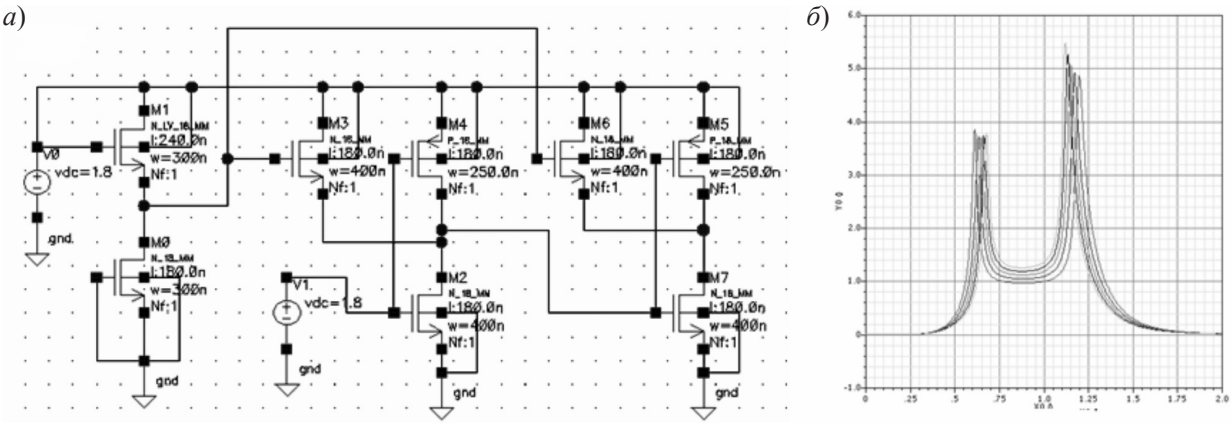


Рис. 2. Модель триггера с разорванной петлей ПОС:
а – схема модели триггера; *б* – результат моделирования

го решения проведено сравнительное моделирование исследуемой ЗЯ и схемы Лиу-Чоу-Ляо с использованием моделей транзисторов, выполненных по МОП-технологии фирмы UMC с проектной нормой 180 нм, в среде Virtuoso Design Environment фирмы Cadence. Схема Лиу-Чоу-Ляо является частным случаем исследуемой ЗЯ при потенциале общей шины триггера, равном потенциалу общей шины ячейки. Поэтому построена схема Лиу-Чоу-Ляо с использованием размеров транзисторов, обеспечивающих достижение характерных параметров ЗЯ из [2, 3] (SNM = 100 мВ, WRM = 600 мВ и I_{cell} = 200 мкА) при нормальных условиях (corner – tt, температура 27 °C) и напряжении питания 1,8 В. После этого проанализирована зависимость параметров схемы от потенциала общей шины триггера при наихудших значениях температуры и комбинациях corner-параметров. Предельные значения температуры выбраны равными границам промышленного диапазона (–40 и 85 °C).

Размеры транзисторов выбраны на основании значений границ областей устойчивости триггера и значений потенциала управляющего узла в различных режимах работы [12]. Для нахождения значений границ проведено моделирование триггера с разорванной петлей ПОС (рис. 2 *а*) и оценочными геометрическими размерами транзисторов [2, 3]: длина затвора L = 180 нм, ширина нагрузочного транзистора W_1 = 250 нм, ширины транзисторов ключей выборки и драйвера $W_a = W_d$ = 400 нм. Ширины транзисторов логического элемента выбраны по 300 нм, причем пропускающий транзистор выполнен с малым (0,2 В) пороговым напряжением, в противном случае невозможно обеспечить требуемый разрядный ток ЗЯ.

На рис. 2 *б* представлены дифференциальные передаточные характеристики исследуемой схемы при различных ширинах транзистора выборки. Аналогичные диаграммы получены при различных ширинах транзисторов драйвера и нагрузочных транзисторов. Границам зоны не-

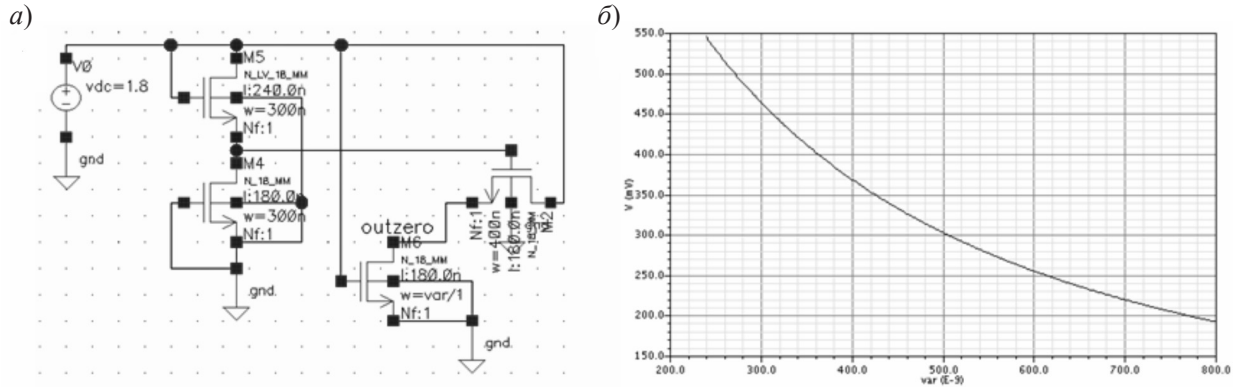


Рис. 3. Определение коэффициента ячейки:
а – схема модели делителя; *б* – результат моделирования

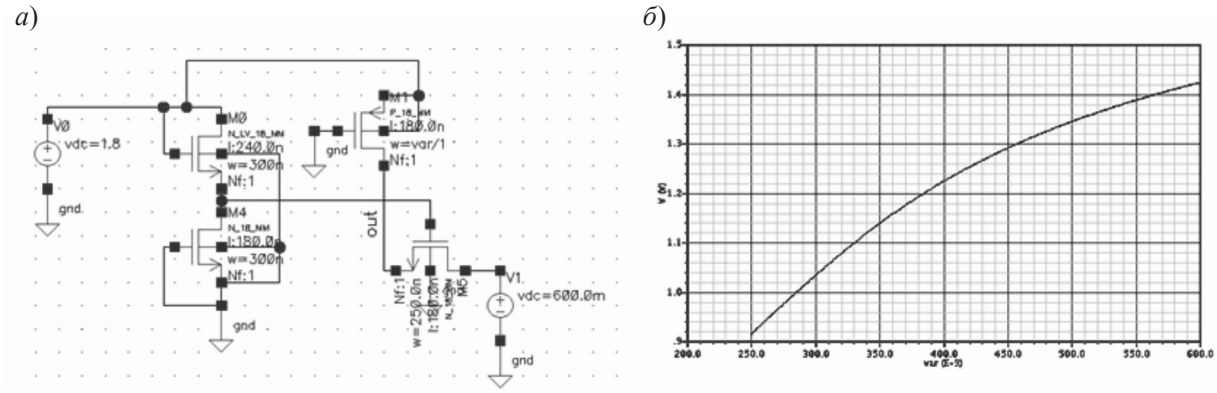


Рис. 4. Определение коэффициента нагрузки:
а – схема модели делителя; *б* – результат моделирования

устойчивости соответствует единичный дифференциальный коэффициент передачи триггера с разорванной петлей ПОС [12]. Оценка границы зоны неустойчивости в режиме записи составляет 1,35 В, а в режиме чтения – 0,5 В.

Значение CR определено по допустимому потенциалу низкого логического уровня (0,5 В) на выходе триггера в режиме чтения путем моделирования делителя напряжения, образованного транзистором выборки и драйвером (рис. 3 *а*). Результаты моделирования при ширине транзистора выборки, равной 400 нм и ширинах транзистора драйвера, изменяющихся в диапазоне от 240 до 800 нм, представлены на рис. 3 *б*. Как видно из графика, CR должен быть не менее 0,7.

Для нахождения значения PR, при котором напряжение высокого логического уровня на выходе триггера попадает в область неустойчивости (1,35 В), проведено моделирование делителя напряжения, образованного транзистором выборки и транзистором нагрузки (рис. 4 *а*). Результаты моделирования при ширине транзистора выборки, равной 250 нм и ширинах транзистора нагрузки, изменяющихся в диапазоне от 250 до 600 нм, представлены на рис. 4 *б*. Как видно из графика, PR должен быть не более двух.

Для определения ширины транзистора выборки, при которой обеспечивается заданный I_{cell}, проведено моделирование делителя напряжения, изображенного на рис. 3 *а*, при различной ширине транзистора выборки и заданном коэффициенте ячейки, выбранном равным 0,8. Результаты моделирования при ширине транзистора выборки, изменяющейся в диапазоне от 300 до 700 нм, представлены на рис. 5. Требуемый ток достигается при ширинах транзистора выборки, больших 400 нм. Таким образом, проведенный анализ позволил выбрать следующие параметры транзисторов триггера: W_1 = 250 нм, $W_a = W_d$ = 450 нм.

Для выбранных размеров транзисторов проведено квазистатическое моделирование ЗЯ во временной области. В соответствии с определением, SNM равен напряжению источников смещения V0 и V1 (рис. 6 *а*), при котором происходит смена состояния триггера. Напряжение источников нарастает линейно от нуля до уровня напряжения питания за время значительно большее, чем длительность процесса переключения триггера, обеспечивая тем самым квазистатический режим моделирования. Источник V3 служит для предварительной установки триггера. При нормальных условиях SNM составил 97 мВ. Полученная зависимость SNM от потенциала общей шины триггера при наихудших условиях (температура 85 °С, параметр corner – fnsp) представлена на рис. 6 *б*, из которого следует, что рассматриваемый способ позволяет увеличить SNM более чем в пять раз.

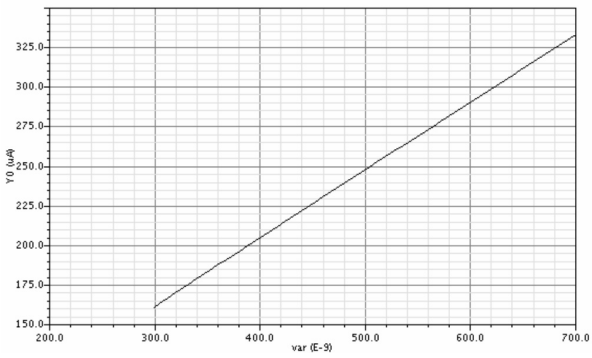


Рис. 5. Определение ширины транзистора выборки

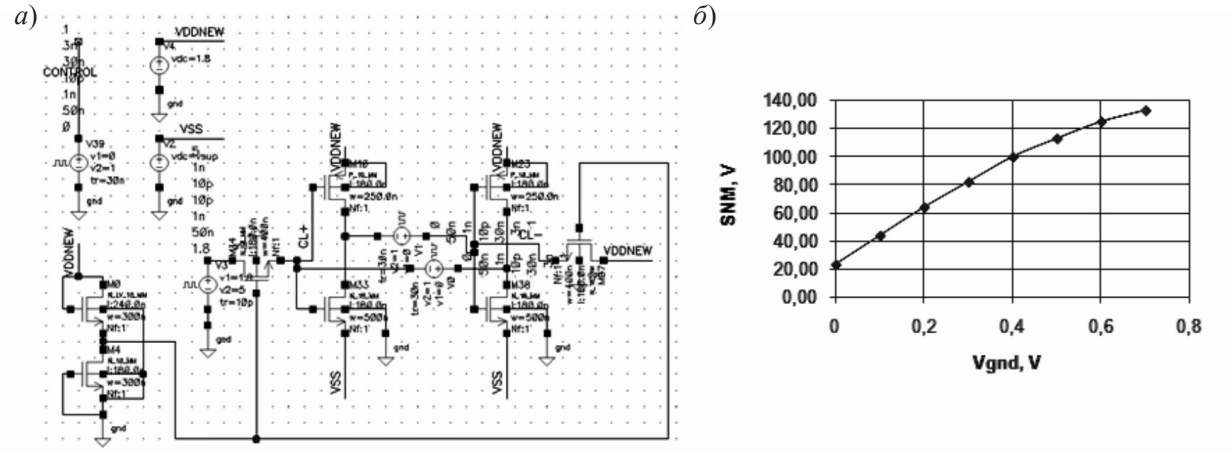


Рис. 6. Определение SNM:
а – схема модели триггера; *б* – результат моделирования

Схема модели, использованной для определения WRM, представлена на рис. 7 *а*. Значение WRM равно потенциалу на входе ЗЯ в момент переключения [3]. При нормальных условиях WRM составил 913 мВ. Полученная зависимость WRM от потенциала общей шины триггера при наихудших условиях (температура –40 °С, параметр corner – snfp) представлена на рис. 7 *б*, из которого следует, что рассматриваемый способ позволяет увеличить WRM более чем на 15 %.

Схема модели, использованной для определения разрядного тока та же, что и для определения SNM. При этом измеряется ток стока транзистора выборки, который при нормальных условиях составил 192 мкА. Полученная зависимость I_{cell} от потенциала общей шины триггера при наихудших условиях (температура –40 °С, параметр corner – snfp) представлена на рис. 8, из которого следует, что при изменении потенциала от 0 до 0,7 В разрядный ток уменьшается в четыре раза. Полученные значения параметров ячейки (SNM, WRM и I_{cell}) при нормальных условиях соответствуют характерным значениям для используемой МОП-технологии с разрешением 180 нм [2, 3].

В статье приведены результаты исследования запоминающей ячейки с повышенной помехозащищенностью, схемотехническое решение которой защищено [4]. Проведено сравнительное моделирование с использованием параметров МОП-технологии с проектной нормой 180 нм, показавшее увеличение запаса статической помехоустойчивости более чем в пять раз (до 133 мВ) без уменьшения порога переключения в режиме записи (900 мВ) и без увеличения площади, занимаемой ячейкой на кристалле, по сравнению

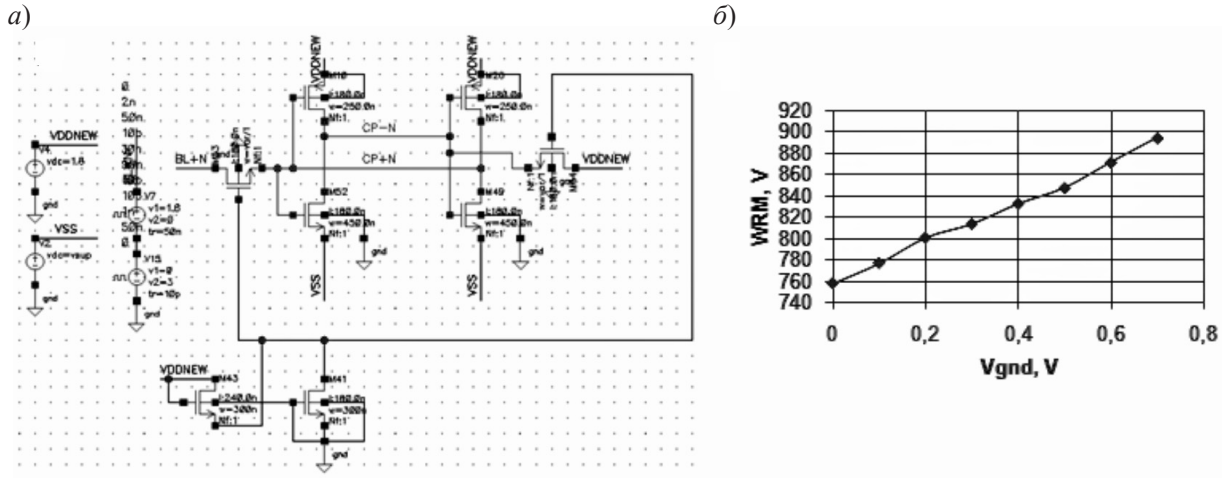


Рис. 7. Определение WRM:
а – схема модели триггера; *б* – результат моделирования

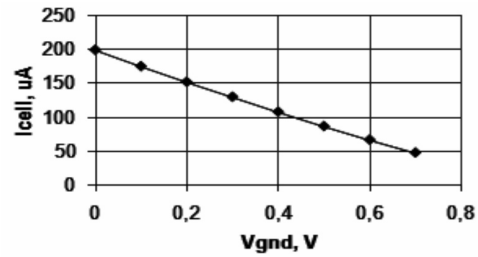


Рис. 8. Определение разрядного тока

с известными схемами [8]. При размерности накопителя 32×32, размерности шины данных 4 бита, половинной амплитуде на разрядных шинах и двухкоординатной выборке потребляемая мощность уменьшилась в 2,5 раза по сравнению с типовыми решениями, и при тактовой частоте 100 МГц составила 45 мкВт.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kang, S.-M. (Steve).** CMOS digital integrated circuits: analysis and design [Text] / S.-M. (Steve) Kang, Y. Leblebici; 3rd ed. –McGraw-Hill, 2003. –1945 p.

2. **Mukherjee, D.** Static Noise Margin Analysis of SRAM Cell for High Speed Application [Text] / D. Mukherjee, H. Kr. Mondal, B.V.R. Reddy // IJCSI International J. of Computer Science Issues. – Sept. 2010. –Vol. 7. –Iss. 5. –P. 175–180.

3. **Kang, D.W.** A Deep Sub-Micron SRAM Cell Design and Analysis Methodology [Text] / D.W. Kang, Y.-B. I'iini // Proc. of the 44th IEEE 2001 Midwest Symp. on Circuits and Systems. –2001. –Vol. 2. –P. 858–861.

4. **Романов, Р.И.** Статическая запоминающая ячейка с двумя адресными входами [Текст] / Р.И. Романов, А.С. Коротков // Роспатент. –Свид. № 20011117657 от 03.05.2011.

5. **Nii, K.** A 90-nm Low-Power 32-kB Embedded SRAM With Gate Leakage Suppression Circuit for Mobile Applications [Text] / K. Nii, Y. Tsukamoto // IEEE J. of Solid-State Circuits. –Apr. 2004. –Vol. 39. –№ 4. –P. 684–693.

6. **Reddy, G.M, S.** Design and Implementation of 8Kbits Low Power SRAM in 180nm Technology [Text] / S. Reddy G M, P.C. Reddy // Proc. of the International Multi Conf. of Engineers and Computer Scientists. –2009. –Vol. 2. –P. 1545–1552.

7. **Рабаи, Ж.М.** Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования [Текст] / Ж.М. Рабаи, А. Чандракасан, Б. Николич; Под ред. Ч.Г. Содини; Пер. с англ. –М.: Изд. дом «Вильямс», 2007. –911 с.

8. **Liu, J.** Патент 0080045A1 США, МКИG11C11/00. Robust 8T SRAM cell [Text] / J. Liu, S.-Y. Chou, H.-J. Liao. –№12/238,850 от 01.04.2010.

9. **Yamauchi, H.** A Discussion on SRAM Circuit Design Trend in Deeper Nanometer-Scale Technologies [Text] / H. Yamauchi // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. –May 2010. –Vol. 18. –№ 5. –P. 763–774.

10. **Athe, P.** A Comparative Study of 6T, 8T and 9T Decanano SRAM cell [Text] / P. Athe, S. Dasgupta // Proc. of the IEEE Symp. on Industrial Electronics and Applications. –4-6 Oct. 2009. –P. 889–894.

11. **Yamaoka, M.** A Cell-activation-time Controlled SRAM for Low-voltage Operation in DVFS SoCs Using Dynamic Stability Analysis [Text] / M. Yamaoka, K. Osada, T. Kawahara // Proc. of the 34th European Solid-State Circuits Conf. –15-19 Sept. 2008. –P. 286–289.

12. **Agarwal, K.** Statistical Analysis of SRAM Cell Stability [Text] / K. Agarwal, S. Nassif // Proc. of the Design Automation Conf. –2006. –43rd ACM/IEEE. –Vol. 5.1. –P. 57–62.

УДК 681.5

Ю.В. Ильюшин

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Электрическая туннельная печь конвейерного типа имеет как ряд преимуществ, так и ряд недостатков. Один из основных недостатков электрических печей этого типа – дорогостоимость в обслуживании энергоресурсами. Так, для накалки одного нагревательного элемента расходу-

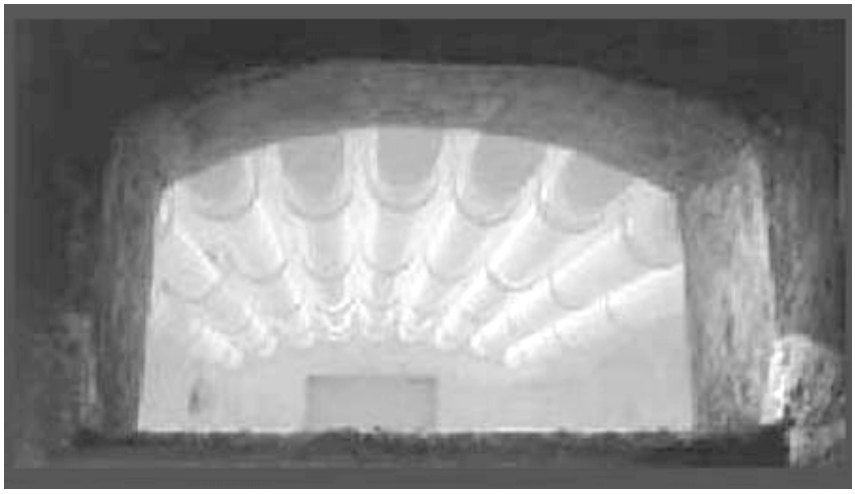


Рис. 1. Фотография расположения нагревательных элементов фирмы «Кантал» (Швеция) в туннельной печи

ется энергия, равная 0,12 % стоимости одного изделия.

В туннельной печи гексагональные карбидокремниевые стержни располагаются по всей длине камеры обжига (рис. 1).

Такие длинные нагревательные элементы требуют длительного времени на пригрев и больших энергозатрат, что оказывает существенное влияние на конечную стоимость изделия. Рассмотрим возможность снижения стоимости за счет использования импульсных нагревательных элементов, которые в свою очередь будут нагревать карбидокремниевые стрежни печи для поддержания заданного температурного режима секции печи. За счет кратковременного включения и будет происходить экономия электроэнергии и, как следствие, снижение стоимости изделия.

Постановка задачи

Поставим задачу расчета оптимального расположения нагревательных элементов для нагрева изотропного стержня. Проведем расчет температурного поля гексагонального карбидокремниевого стержня при воздействии на стержень импульсными нагревательными элементами с релейным принципом управления. Рассмотрим систему управления, структурная схема, которой представлена на рис. 2.

Для решения поставленной задачи необходимо определить место включения нагревательного элемента, при котором в карбидокремниевом стержне будет поддерживаться необходимый температурный режим [1]. Тем самым необходимо найти методику поиска оптимального расположения нагревательных элементов при стабилизации температурного поля туннельной печи конвейерного типа. Данную методику необходимо проверить на гексагональном карбидокремниевом стержне, применяемом в камерах обжига строительной керамики в электрических туннельных печах конвейерного типа

Методика расчета оптимального количества нагревательных источников в зависимости от значений температурного поля

Рассмотрим алгоритм расчета оптимального расположения импульсных нагревательных элементов.

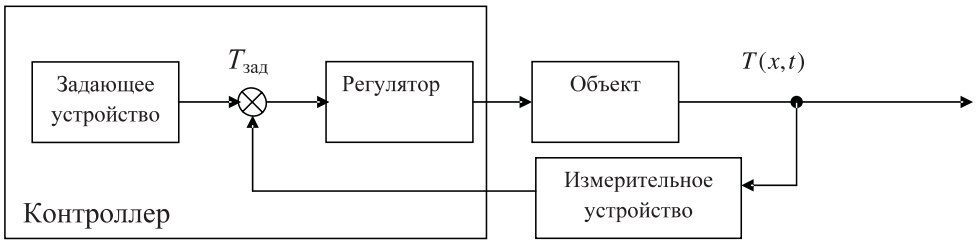


Рис. 2. Структурная схема замкнутой системы регулирования

1. Ввести в систему начальные значения системы: n – количество членов ряда Фурье; l – длина стержня; t – время; x – точка расположения датчика температуры; ξ – точка расположения нагревательного элемента; τ – момент включения точечного источника; a^2 – заданный коэффициент температуропроводности материала объекта управления; $T_{зад}$ = const – заданное температурное значение.

2. Поставить и решить задачу стабилизации температурного поля объекта при различном числе нагревательных элементов.

3. В момент создания управляющих воздействий определить место и время включения нагревательных элементов.

Изучим представленный алгоритм более подробно. Для решения задачи расчета температурного поля используем функцию Грина, которая будет создавать управляющие воздействия на систему в целом:

$$G(x,t,\xi,\tau) = \\ = \frac{2}{l}\sum_{n=1}^{\infty}\exp\left[-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2(t-\tau)\right]\sin\frac{\pi n}{l}x\sin\frac{\pi n}{l}\xi. \quad (1)$$

Поскольку описывается динамическая система, будем рассматривать функцию Грина с учетом функции начального нагрева. Такой подход позволит определить значение температуры в изотропном стержне [2, 3]:

$$T(x_j,t) = \sum_{i=1}^{d}\sum_{n=1}^{k}\frac{2}{l}\exp\times \\ \times\left[-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 t\right]\sin\frac{\pi n}{l}x_j\sin\frac{\pi n}{l}\xi_i + \quad (2)$$

$$+\sum_{p}\sum_{n=1}^{k}\frac{2}{l}\exp\left[-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2(t-\tau_p)\right]\times \\ \times\sin\frac{\pi n}{l}x_j\sin\frac{\pi n}{l}\xi_{z(p)}.$$

Стабилизируем температуру в некоторой точке стержня на уровне заданного значения $T_{зад}$ = const. [4]:

$$T(x_i,t_j) = \frac{2}{l}\sum a_n\exp\left[-\left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2 t_j\right]\times \\ \times\sin\frac{n\pi}{l}x_i = T_{i,j,зад}(x_i,t_j). \quad (3)$$

С течением времени температура в точке x_i, убывая, достигла значения $T_{зад}$ = const. В некоторый момент времени $t = \tau_i$. Тогда включается источник ξ_i, соответствующий датчику x_i, и создает температурное воздействие на все точки стержня. Необходимо рассчитать местонахождение температурного нагревательного элемента. Для этого выразим значение переменной ξ_i в момент времени $t = \tau_i$:

$$\xi = \arcsin\left(\frac{\frac{2}{l}\sum_{n=1}^{\infty}\exp\left[-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2(t-\tau)\right]\sin\frac{\pi n}{l}x}{G(x,t,\xi,\tau)}\right)\frac{l}{n\pi}. \quad (4)$$

Для того чтобы решение было справедливо для любых значений температурной кривой, необходимо в начальный момент времени ввести в систему чрезмерное количество нагревательных элементов. Так как система будет создавать управляющее воздействие только в точках, где значение температуры будет ниже заданного значения, такое действие не создаст избыточных вычислений. Тогда для решения поставленной задачи необхо-

Значение температурного поля в секции при различном количестве нагревательных элементов

Номер источника	Количество нагревательных элементов в секции			
	8	7	6	5
1	tmas[1,690]=2,01	tmas[1,690]=1,99	tmas[1,690]=1,95	tmas[1,690]=1,89
2	tmas[2,690]=3,73	tmas[2,690]=3,59	tmas[2,690]=3,39	tmas[2,690]=3,07
3	tmas[3,690]=4,87	tmas[3,690]=4,48	tmas[3,690]=3,91	tmas[3,690]=3,07
4	tmas[4,690]=5,27	tmas[4,690]=4,48	tmas[4,690]=3,39	tmas[4,690]=3,89
5	tmas[5,690]=4,87	tmas[5,690]=3,59	tmas[5,690]=3,95	tmas[5,690]=1,75
6	tmas[6,690]=3,73	tmas[6,690]=1,99	tmas[6,690]=2,12	
7	tmas[7,690]=2,01	tmas[7,690]=2,49		
8	tmas[8,690]=2,86			

димо и достаточно вычисление моментов включения нагревательных элементов [5].

Ввиду того, что количество нагревательных элементов чрезмерно велико, точность вычисления точки нахождения нагревательного элемента будет достаточной. Однако следует заметить, что если берем кратное число расположения нагревательных элементов, то при математическом расчете находим координату с максимально возможной точностью. Что в свою очередь ведет к вычислению точки расположения нагревательного элемента.

Поэтому можно сделать вывод о том, что точность нахождения точки расположения нагревательного элемента зависит от количества нагревательных элементов.

Для проверки полученных результатов рассмотрим гексагональную карбидокремниевую структуру со следующими характеристиками: l = 1 м, k = 10, d = 9, $x_1 = \xi_1 = 1$ м, $T_{зад}$ = 0,2 с^0, $\xi_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, a^2 = 0,00000052 м^2/с.

Рассмотрим полученные результаты. Из таблицы видно, что, например при установке восьми управляющих воздействий, на стержень длиной 1 м будут задействованы только второй, третий, четвертый и пятый нагревательный элемент, а остальные четыре работать не будут. При установке пяти нагревательных элементов будет работать только первый и третий. Следовательно, экономически целесообразно (при данной длине стержня) использовать только два нагревательных элемента, установленных в позициях 1 и 3. При изменении температуры стабилизации или мощности нагревательного элемента будут использоваться другие нагревательные элементы. Отсюда следует вывод, что данная методика расчета оптимального месторасположения нагревательных элементов применима к любым температурным процессам, для которых существует решение в виде функции Грина.

Техническая реализация данной задачи будет выглядеть, как показано на рис. 3.

Исходя из заданной точности, которая для приведенного примера равна 9 (расчет велся по 9 членам ряда Фурье), можно обратить внимание на то, что предложенная методика позволила рассчитать месторасположение нагревательного элемента с точностью до третьего знака.

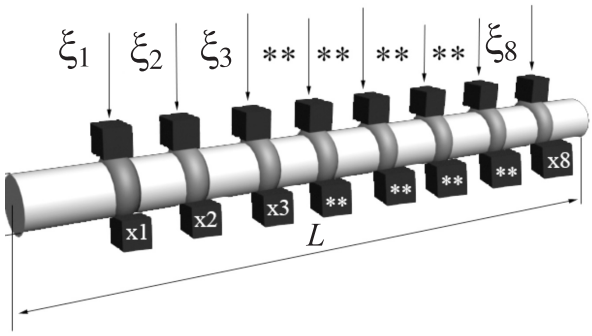


Рис. 3. Объект управления – цилиндрический стержень

Приведенная методика рассматривает возможность замены сплошных нагревательных элементов на импульсные. Новизна и техническая особенность данной методики заключается в следующем.

Использование инновационного подхода к нагреву гексагональных карбидокремниевых структур является актуальной задачей, т. к. именно стержни из этого сплава используются при обжиге керамики, кирпича и других изделий.

Данная методика рассчитана не только на гексагональные карбидокремниевые структуры, но и на другие сплавы.

Предложенная методика позволит снизить конечную стоимость изделия путем экономии на энергоресурсах предприятия.

Рассмотренная методика, совместно с программно-аппаратным комплексом для стабилизации температурного поля туннельных печей конвейерного типа позволит решать широкий круг задач, необходимых современной промышленности [1].

Таким образом, разработанная методика может быть обобщена на класс систем, для которых существует фундаментальное решение (функция Грина). При этом усложнение выражения функции Грина естественно вызывает увеличение затрат на вычислительный процесс. Однако если сравнить затраты из-за низкого КПД нагревательных элементов, то использование математического моделирования для расчета места расположения нагревательных элементов оправдано [6–8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ильюшин, Ю. В.** Стабилизация температурного поля туннельных печей конвейерного типа [Текст] / Ю.В. Ильюшин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 3 (126). – С 67–72.

2. **Тихонов, А.Н.,** Уравнения математической физики [Текст] / А.А. Самарский, А.Н. Тихонов. –М.: Наука, 1972. –736 с.

3. **Душин, С.Е.** Теория автоматического управления [Текст] / Н.С. Зотов, С.Е. Душин [и др.]; Под ред. В.Б. Яковлева. –М.: Высш. шк., 2003. –567 с.

4. **Першин, И.М.** Анализ и синтез систем с распределенными параметрами [Текст] / И.М. Першин. –Пятигорск: Изд-во РИА-КМВ, 2007. –244 с.

5. **Чернышев, А.Б.** Модификация критерия абсолютной устойчивости для систем с распределенными параметрами [Текст] / А.Б. Чернышев. –Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2008. –С. 49–69.

6. **Ильюшин, Ю.В.** Определение шага дискретизации для расчета теплового поля трехмерного объекта управления [Текст] / Ю.В. Ильюшин, А.Б. Чернышев. // Изв. Южного федерального ун-та. –Таганрог, 2011. –№ 6. –С 192–200.

7. **Ильюшин, Ю.В.** Устойчивость распределенных систем с дискретными управляющими воздействиями [Текст] / Ю.В. Ильюшин, А.Б. Чернышев // Изв. Южного федерального ун-та. –Таганрог, 2010. –№ 12. –С 166–171.

8. **Чернышев, А.Б.** Система стабилизации температурного поля в процессе утилизации тепла при контактной сварке [Текст] / А.Б. Чернышев, В.Ф. Антонов, Д.Л. Шураков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –№ 6 (113). –С. 151–155.

УДК 621.525 (088.8)

А.В. Власов, Э.М. Кузнецова, Ю.В. Николаенко

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО КЛАПАНА И ВОЛНОВОГО НАСОСА С МАГНИТОЖИДКОСТНЫМ СЕНСОРОМ

Одно из перспективных направлений разработки гидрофицированного технологического оборудования – создание электрогидравлических и гидроэлектрических элементов систем управления и, в частности, магнитожидкостных, основанных на управлении магнитной жидкостью, заключенной в упругую оболочку [1–4]. Волновой насос и одностворчатый клапан с магнитожидкостными сенсорами (МЖС) относятся к элементной базе нового поколения аппарата «Искусственное сердце» [5, 6]. Отличительной особенностью таких устройств является то, что трение скольжения между МЖС и патрубками проточной части замещается трением качения, в связи с чем устраняется основная причина разрушения формообразующих элементов крови – лейкоцитов [7, 8].

В настоящей статье предложены расчетные соотношения для оценки статических и динамических характеристик электрогидравлического клапана и волнового насоса с перфоцентрической схемой магнитожидкостного сенсора.

Одностворчатый клапан с перфоцентрическим МЖС представляет собой электрогидравлический элемент для коммутации и регулирования гидравлических потоков [5] (рис. 1). На патрубок 1 устанавливается секция электромагнитной обмотки 2, на которую подается управляющее напряжение U_1. МЖС 3 представляет собой упругую оболочку из каучука, заполненную магнитной жидкостью. При подаче управляющего напряжения на секцию у МЖС образуется гребень, который при возрастании управляющего напряжения ($U_2 > U_1$) полностью перекрывает поперечное сечение патрубка 1 (технологические детали взаимодействия управляющей обмотки и сенсора здесь опустим). Если гребень не перекрывает поперечное сечение, в патрубке может образовываться поток рабочей жидкости Q. Если поперечное сечение перекрыто, потока нет ($Q = 0$). Именно поэтому такое устройство может использоваться как в качестве коммутатора потоков (клапана), так и в качестве регулятора потоков. Отличительной особенностью такого устройства является то, что в нем трение сколь-

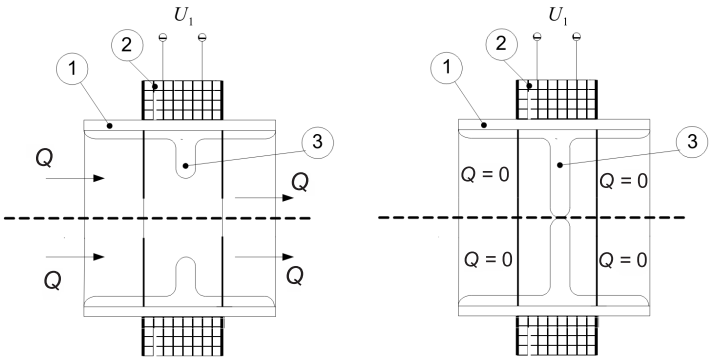


Рис. 1. Перфоцентрическая схема магнитожидкостного клапана

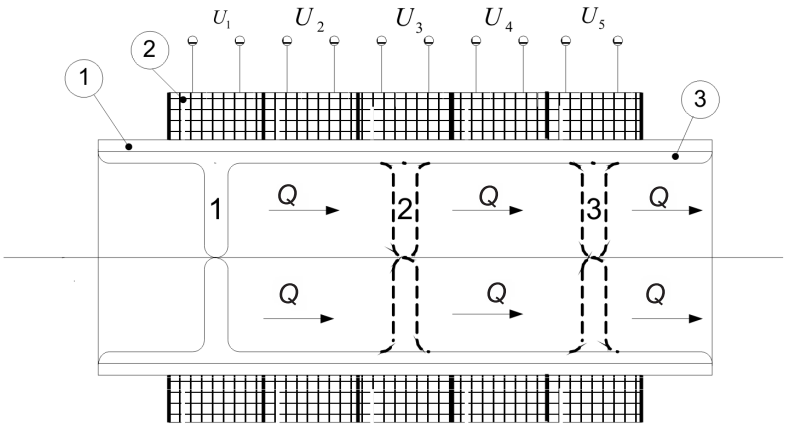


Рис. 2. Перфоцентрическая схема волнового насоса

жения между гребнем МЖС 3 и патрубком 1 отсутствует. Здесь присутствует трение качения.

Волновой насос (ВН) с перфоцентрическим МЖС представляет собой электрогидравлический элемент для перекачки жидкостей [6] (рис. 2). Конструктивно этот элемент состоит из пяти последовательно соединенных между собой одностворчатых клапанов, установленных на патрубке 1.

Для анализа динамики клапана и насоса необходимо проследить миграцию векторов Умова в элементе от места подачи входного управляющего воздействия (напряжения U на управляющую обмотку) до места появления выходного сигнала, в качестве которого в устройствах выступает расход жидкости Q.

Функциональная схема электрогидравлического элемента с магнитожидкостным сенсором приведена на рис. 3.

В первом блоке напряжение на управляющей обмотке преобразуется в ток $U \to I$. Динамика такого блока должна описываться в операторах систем с сосредоточенными параметрами (ССП).

Второй блок – это преобразователь ток – напряженность магнитного поля вокруг управляющей обмотки $I \to \overline{H}$. Динамика такого блока должна описываться в операторах систем с распределенными параметрами (СРП).

Третий блок – это преобразователь градиента напряженности магнитного поля в объемную силу вокруг обмотки управления $\nabla H \to f_{\text{М}}$. Уравнение преобразования здесь простое [9]:

$$f_{\text{М}} = \mu_0 \text{M} \nabla H, \qquad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; M – максимальная намагниченность насыщения МЖ, А/м; ∇H – градиент напряженности магнитного поля, А/м^2; f_M – объемная плотность силы втягивания МЖ в область неоднородного магнитного поля, Н/м^3. Динамика такого блока должна описываться в операторах ССП.

Четвертый блок – это преобразователь объемной плотности силы вокруг управляющей обмотки в континуальное перемещение МЖС $f_{\text{М}} \to L$. Динамика такого блока должна описываться в операторах СРП.

Пятый блок – это преобразователь перемещения МЖС (точнее сказать – упругой оболочки МЖС) в гидравлическое сопротивление проточной части клапана $L \to \xi$. Динамика такого блока

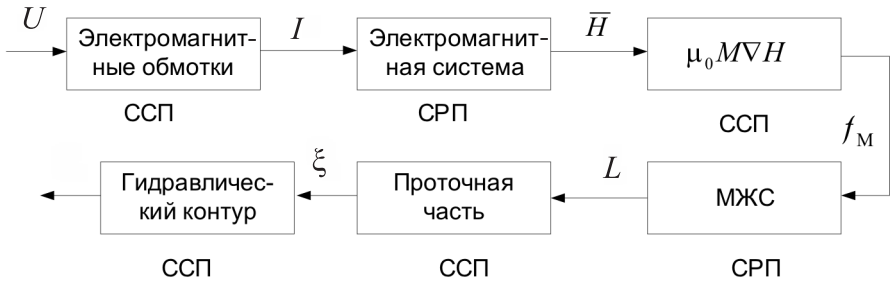


Рис. 3. Функциональная схема электрогидравлического элемента с магнитожидкостным сенсором

должна описываться в операторах СРП.

Шестой блок – это преобразователь гидравлического сопротивления проточной части клапана в расход гидравлического контура (клапан, соединительные гидравлические диссипаторы, нагрузка) $\xi \to Q$. Динамика такого блока должна описываться в операторах ССП. Динамика клапана определяется результирующей динамикой всех шести блоков.

В настоящей работе дается анализ статики и динамики пятого блока – преобразователя $L \to \xi$, т. е. преобразователя перемещения контура МЖС в гидравлическое сопротивление проточной части устройства. В клапане такой цикл преобразования является основным: клапан циклично переключается из открытого состояния в закрытое, при этом контур (упругая оболочка) МЖС перемещается ортогонально относительно продольной оси устройства. Что касается волнового насоса, то контур МЖС осуществляет такие ортогональные перемещения с меньшей частотой, соответствующей количеству продольных тянущих обмоток устройства (например, пять), т. е. такие же перемещения МЖС осуществляются внутри каждой тянущей обмотки.

Исходя из представленных конструкций клапана и насоса (рис. 1, 2) можно предложить *перфоцентрическую* расчетную схему: МЖС закреплен на периферии проточной части и под действием тянущего электромагнитного поля перемещается к оси проточной части (рис. 4).

На патрубок 1 проточной части устанавливается управляющая обмотка 2, на которую подается управляющее напряжение U_1. МЖС 3 также закрепляется на патрубке 1 и при воздействии тянущего электромагнитного поля образует гребень 4, который вытягивается от периферии проточной части к продольной оси симметрии. При этом сечение проточной части изменяется от максимального (патрубок полностью открыт) до нуля (патрубок полностью перекрыт). Гидравлическое сопротивление патрубка – это отношение перепада давления на патрубке, который создается при течении жидкости через патрубок от внешнего насоса, к скоростному напору, создаваемому на этом патрубке насосом [10].

На рис. 4 обозначено: V_1, V_0 – средние скорости жидкости до гребня МЖС 4 и после него соответственно, м/с; D_1, D_0 – диаметры проточной части до гребня (после гребня) 4 МЖС и ограниченные гребнем 4 МЖС соответственно, м; $F_1 = \frac{\pi D_1^2}{4}$ – площадь поперечного сечения проточной части патрубка 1 до гребня МЖС и после него, м^2; $F_0 = \frac{\pi D_0^2}{4}$ – площадь поперечного сечения открытой части патрубка 1, м^2; r – радиус закругления МЖС, м; $\rho_{МЖС}$ – радиус вытягивания МЖС от периферии проточной части к продольной оси, м; $\rho_{ОПР}$ – радиус открытой проточной части, м.

Гидравлическое сопротивление проточной части устройства вычисляется по формуле [10]:

$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{\rho V_1^2}{2}} = \left[1 + \sqrt{\xi'(1 - \frac{F_0}{F_1})} - \frac{F_0}{F_1} \right]^2 (\frac{F_1}{F_0})^2, \quad (2)$$

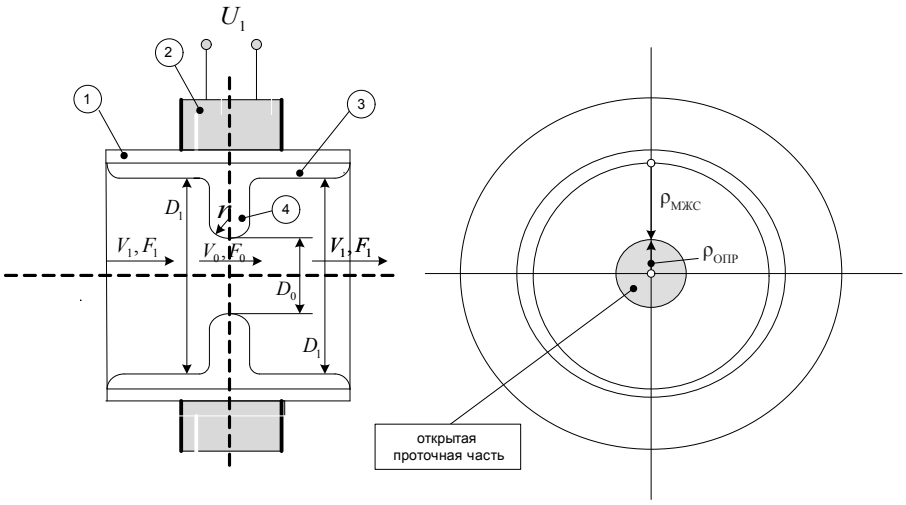


Рис. 4. Расчетная схема перфоцентрического магнитожидкостного сенсора

Таблица 1

Значение коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от отношения ($r/D_Г$)

$r/D_Г$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,12	0,16	≥ 0,2
ξ	0,50	0,44	0,37	0,31	0,26	0,22	0,19	0,15	0,09	0,06	–0,03

где Δp – перепад (потери) давления на проточной части устройства, Па; $\frac{\rho V_1^2}{2}$ – скоростной напор входящего в проточную часть устройства, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; $\xi' = f_1(\frac{r}{D_Г})$ – коэффициент, который выбирается из табл. 1 [10]; r – радиус закругления МЖС, м; $D_Г = \frac{4F_0}{\Pi_0}$ – гидравлический диаметр открытой проточной части (на рисунке заштрихована), м; $\Pi_0 = \pi D_0$ – периметр открытой проточной части, м.

МЖС 4 при воздействии тянущего поля перемещается от периферии к продольной оси устройства и изменяет свой радиус $\rho_{МЖС}$. Величина площади поперечного сечения открытой проточной части может быть выражена в виде:

$$F_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} = \pi \rho_{ОПР}^2 = \pi(\frac{D_1}{2} - \rho_{МЖС})^2. \quad (3)$$

Составим отношение:

$$\frac{F_1}{F_0} = \frac{D_1^2}{(D_1 - 2\rho_{МЖС})^2} = \frac{D_1^2}{D_0^2}. \quad (4)$$

Подставим (3) и (4) в (2):

$$\xi = \frac{p}{\frac{\rho V_1^2}{2}} = \quad (5)$$

$$= \left[1 + \sqrt{\xi'(1 - \frac{(D_1 - 2\rho_{МЖС})^2}{D_1^2})} - \frac{(D_1 - 2\rho_{МЖС})^2}{D_1^2}\right]^2 \times$$

$$\times \frac{D_1^4}{(D_1 - 2\rho_{МЖС})^4}.$$

Таким образом, связь выходного параметра ξ от входного $\rho_{МЖС}$ получена, но не в явном виде. Получить в явном виде в общем случае функцию $\xi = f(\rho_{МЖС})$ не представляется возможным. Это возможно только в частных случаях. Получим ее, для примера, задавшись конкретными значениями размеров проточной части. Допустим, D_1 = 0,04 м. Для $\rho_{МЖС}$ зададим несколько значений от 0 до 0,02 м. Результаты расчетов поместим в таблицу. Предварительно уточним выражение для гидравлического диаметра проточной части:

$$D_Г = \frac{4F_0}{\Pi_0} = \frac{4\pi(D_1 - 2\rho_{МЖС})^2}{4\pi(D_1 - 2\rho_{МЖС})} = \quad (6)$$
$$= (D_1 - 2\rho_{МЖС}) = D_0.$$

Примем радиус закругления МЖС неизменным в процессе управления электрогидравлическим элементом и равным r = 0,002 м. Результаты расчетов сведем в табл. 2.

Изобразим функцию

$$\xi = f(\rho_{МЖС}) \quad (7)$$

на графике (рис. 5). Это и будет статическая характеристика рассматриваемого звена. Она является существенно нелинейной. Аналитическое выражение ее можно получить в виде суммы степенных полиномов Чебышева или Лежандра.

Таблица 2

Расчетные значения коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от радиуса вытягивания магнитожидкостного сенсора

D_1, м	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
r, м	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
$\rho_{МЖС}$, м	0,000	0,005	0,010	0,015	0,020
$D_0 = D_Г$, м	0,040	0,030	0,020	0,010	0,000
$r/D_Г$	0,05	0,066	0,10	0,20	∞
ξ'	0,22	0,20	0,10	0,01	–0,03
ξ	0,000	0,952	4,20	17,11	∞

Из полученного видно, что при $\rho_{МЖС} > 0{,}03$ м коэффициент ξ гидравлического сопротивления резко растет до бесконечности, т. е. непосредственно перед закрытием проточной части электрогидравлический элемент становится существенно нелинейным. В области основного регулирования $0 \le \rho_{МЖС} \le 0{,}03$ м полученный график может быть разбит в первом приближении на три участка: $0 \le \rho_{МЖС} \le 0{,}01$ м; $0{,}01 < \rho_{МЖС} \le 0{,}02$ м; $0{,}02 < \rho_{МЖС} \le 0{,}03$ м. Рассчитаем коэффициенты пропорциональности двух величин на каждом из участков. Для получения коэффициентов динамического преобразования необходимо уравнение (7) преобразовать в безразмерный вид, в котором коэффициенты являются или безразмерными или имеют размерность времени в степени, равной порядку производной, при которой стоит этот коэффициент [11–13]. Для перевода (7) в относительную форму произведем разложение в ряд Тейлора в окрестности точек $\rho_{МЖС} = 0{,}005$ м; $\rho_{МЖС} = 0{,}01$ м; $\rho_{МЖС} = 0{,}015$ м. Рассмотрим подробно технологию получения безразмерного уравнения для точки $\rho_{МЖС} = 0{,}005$ м. Для этой точки ряд Тейлора запишется в виде:

$$\xi_1 = \xi_{01} + \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial \rho_{1МЖС}}\right)\Delta\rho_{1МЖС} + k_{ВПМ}, \qquad (8)$$

где ξ_1 – гидравлическое сопротивление проточной части устройства в окрестности $\rho_{МЖС} = \rho_{1МЖС} = 0{,}005$ м; ξ_{01} – гидравлическое сопротивление проточной части устройства при $\rho_{МЖС} = \rho_{1МЖС} = 0{,}005$ м; $\left(\frac{\partial \xi_1}{\partial \rho_{1МЖС}}\right)$ – частная производная гидравлического сопротивления проточной части устройства ξ_1 в окрестности $\rho_{МЖС} = \rho_{1МЖС} = 0{,}005$ м по изменению радиуса втягивания МЖС $\rho_{МЖС}$ в окрестности той же точки; $\Delta\rho_{1МЖС}$ – динамическое отклонение радиуса втягивания МЖС $\rho_{МЖС}$ в окрестности точки $\rho_{МЖС} = \rho_{1МЖС} = 0{,}005$ м; $k_{ВПМ}$ – сумма частных производных функции ξ_1 по $\Delta\rho_{1МЖС}$ порядка выше первого. Для дальнейшего учитывать $k_{ВПМ}$ в силу ее малости не будем (т. е. фактически оставляем первый член разложения ряда Тейлора). С учетом этого разделим каждый член уравнения (8) на величину $\xi_{max} = 17{,}11$:

$$\frac{\xi_1}{\xi_{max}} = \frac{\xi_{01}}{\xi_{max}} + \frac{1}{\xi_{max}}\left(\frac{\partial \xi_1}{\partial \rho_{1МЖС}}\right)\Delta\rho_{1МЖС}. \qquad (9)$$

Это уравнение уже является безразмерным, но для получения безразмерного динамического коэффициента крутизны необходимо нормировать и входное воздействие $\Delta\rho_{1МЖС}$, для чего умножим и разделим последний член правой части на $\rho_{МЖС} = \rho_{max} = 0{,}02$ м:

$$\frac{\xi_1}{\xi_{max}} = \frac{\xi_{01}}{\xi_{max}} + \frac{1}{\xi_{max}} \cdot \frac{\rho_{max}}{\rho_{max}}\left(\frac{\partial \xi_1}{\partial \rho_{1МЖС}}\right)\Delta\rho_{1МЖС}. \qquad (10)$$

Перепишем полученное уравнение в виде:

$$\bar{\xi}_1 = \bar{\xi}_{01} + \left(\frac{\partial(\xi_1/\xi_{max})}{\partial(\rho_{1МЖС}/\rho_{max})}\right)(\Delta\rho_{1МЖС}/\rho_{max}) = \\ = \bar{\xi}_{01} + \left(\frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial \bar{\rho}_{1МЖС}}\right)\Delta\bar{\rho}_{1МЖС}, \qquad (11)$$

где $\bar{\xi}$ – безразмерное гидравлическое сопротивление; $\bar{\rho}$ – безразмерный радиус втягивания МЖС. Уравнение в отклонениях описывает динамику рассматриваемого звена в окрестности точки $\rho_{МЖС} = \rho_{1МЖС} = 0{,}005$ м. Для определения динамического коэффициента крутизны в окрестности рассматриваемой точки на основе уравнения (11) надо взять производную $\frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial(\Delta\bar{\rho}_{1МЖС})}$. Нетрудно увидеть, что она будет равна

$$\frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial(\Delta\bar{\rho}_{1МЖС})} = \left(\frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial \bar{\rho}_{МЖС}}\right). \qquad (12)$$

Это и есть выражение для динамического коэффициента усиления рассматриваемого устройства в окрестности точки $\rho_{МЖС} = \rho_{1МЖС} = 0{,}005$ м. Фактически, это угол наклона касательной к функции $\bar{\xi}$ в точке $\rho_{МЖС} = \rho_{1МЖС} = 0{,}005$ м. Практически ее нетрудно посчитать в приращениях: $\partial\bar{\xi}_1 \approx \Delta\bar{\xi}_1$ и $\partial(\bar{\rho}_{1МЖС}) \approx \Delta\bar{\rho}_{1МЖС}$. Для $\rho_{МЖС} = \rho_{1МЖС} = 0{,}005$ м будем иметь: $\Delta\bar{\rho}_{1МЖС} = \frac{0{,}001\text{м}}{0{,}02\text{ м}} = 0{,}05$; для такого отклонения в 0,001 м $\rho_{МЖС} = 0{,}004$ м и по формуле (5) величина $\Delta\xi_1$ будет равна 0,1 что для $\Delta\bar{\xi}_1$ даст: $\Delta\bar{\xi}_1 = \frac{0{,}1}{17{,}11} = 0{,}0058$. Отсюда динамический коэффициент усиления в точке

Рис. 5. Статическая характеристика проточной части электрогидравлического элемента

$\rho_{МЖС} = \rho_{1МЖС} = 0{,}005$ будет равен $k_{Д1} = \frac{0{,}0058}{0{,}05} =$ $=0{,}116$. Если задавать такие же динамические отклонения $\Delta\overline{\rho}_{1МЖС} = \frac{0{,}001м}{0{,}02\ м} = 0{,}05$ и для точек $\rho_{1МЖС} = 0{,}01$ м и $\rho_{2МЖС} = 0{,}015$ м, то будем иметь соответственно по той же формуле (5): $\Delta\overline{\xi}_2 = \frac{0{,}45}{17{,}11} = 0{,}0263$; $\Delta\overline{\xi}_3 = \frac{2}{17{,}11} = 0{,}116$. Соответствующие значения динамических коэффициентов усиления будут $k_{Д2} = \frac{0{,}0263}{0{,}05} = 0{,}526$; $k_{Д3} = \frac{0{,}116}{0{,}05} = 2{,}32$. Таким образом, динамическая крутизна управления МЖС проточной частью устройства растет по мере втягивания МЖС от периферии к центральной оси проточной части. Это же наблюдается и по статической характеристике. Для получения передаточных функций необходимо иметь информацию о временном запаздывании процесса изменения гидравлического сопротивления ξ от перемещения МЖС $\rho_{МЖС}$. Поскольку преобразование $\rho_{МЖС} \to \xi$ происходит без запаздывания, то звено является чисто усилительным (безынерционным). Передаточная функция такого звена в трех рассматриваемых точках будет выглядеть следующим образом:

$$W_1(p) = \frac{\Delta\overline{\xi}_1(p)}{\Delta\overline{\rho}_{1МЖС}(p)} = 0{,}116; \quad (13)$$

$$W_2(p) = \frac{\Delta\overline{\xi}_2(p)}{\Delta\overline{\rho}_{2МЖС}(p)} = 0{,}526; \quad (14)$$

$$W_3(p) = \frac{\Delta\overline{\xi}_3(p)}{\Delta\overline{\rho}_{3МЖС}(p)} = 2{,}32. \quad (15)$$

Усреднять параметры динамического коэффициента усиления по всему диапазону изменения $\rho_{МЖС}$ смысла не имеет. Эту информацию необходимо вводить в управляющий микропроцессор для получения желаемых параметров регулирования и, соответственно, желаемых логарифмических амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик.

Таким образом, из изложенного выше следует, что перфоцентрическая схема клапана и насоса позволяет полностью перекрывать проходное сечение рабочего канала (гидравлическое сопротивление увеличивается в 18 раз), причем гидравлическое преобразование может быть описано безынерционным звеном с динамическим коэффициентом усиления в диапазоне от 0,116 до 2,32.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Денисов, А.А.** Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики [Текст] /А.А.Денисов, В.С.Нагорный. –Л.: Машиностроение, 1979. –288 с.

2. **Власов, А.В.** Электрогидравлическое магнитожидкостное регулирующее устройство [Текст] / А.В. Власов. –Балаково: Изд-во БИБиУ, 2010. – 258 с.

3. **Власов, А.В.** Упругооболочечные магнитожидкостные элементы систем управления [Текст] /А.В. Власов. –Балаково: Изд-во БИБиУ, 2011. –Т. 1. –353 с.

4. **Власов, А.В.** Упругооболочечные магнитожидкостные элементы систем управления [Текст] / А.В. Власов. –Балаково: Изд-во БИБиУ, 2011. –Т. 2. –289 с.

5. **Кузнецова, Э.М.** Анализ энергетики низконапорного клапана для синтеза аппарата «Искусственное сердце» [Текст] / Э.М. Кузнецова, А.В. Власов // Вестник БИБиУ. –2009. –№ 1 (2). –С. 69–74.

6. **Николаенко, Ю.В.** Векторно-энергетический анализ формирователей гидравлических импульсов для систем кровообращения [Текст] / Ю.В. Николаенко, А.В. Власов // Вестник БИБиУ. –2009. –№ 1 (2). –С. 84–88.

7. **Орловский, П.И.** Искусственные клапаны сердца [Текст] /П.И. Орловский, В.В. Гриценко, А.Д. Юхнев [и др.]. –М.: Олма, 2007. –448 с.

8. **Шумаков, В.И.** Искусственное сердце и вспомогательное кровообращение [Текст] / В.И. Шумаков, В.Е. Толпекин, Д.В. Шумаков. –М.: Янус-К, 2003. –376 с.

9. **Орлов, Д.В.** Магнитные жидкости в машиностроении [Текст] / Д.В. Орлов. –М.: Машиностроение, 1993. –272 с.

10. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. –М. –Л.: ГЭИ, 1960. –464 с.

11. **Чемоданов, Б.К.** Математические основы теории автоматического регулирования [Текст] / Б.К. Чемоданов. –М.: ВШ, 1977. –Т. 1. –518 с.

12. **Мееров, М.В.** Теория автоматического регулирования и авторегуляторы [Текст] / М.В. Мееров, В.Г. Дианов. –М.: ГНТИ, 1962. –416 с.

13. **Бесекерский, В.А.** Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. –М.: Наука, 1966. –992 с.

УДК 004.4'244, 004.4'236

А.С. Григоров

ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ КАРТОТЕЧНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ МЕТАДАННЫХ

В большинстве крупных муниципальных образований Российской Федерации происходит активное внедрение информационных систем, охватывающих различные стороны деятельности органов местного самоуправления и их подведомственных организаций. За последнее десятилетие многие муниципальные организации успели внедрить у себя собственные внутренние информационные системы (ИС). В большинстве случаев они реализовывались в виде десктопных приложений, устанавливаемых на компьютеры всех операторов, которые с ними работали.

При использовании данного подхода со временем у организаций мог возникнуть целый ряд проблем, связанных с поддержкой используемых программных комплексов: администрирование целого парка компьютеров с установленным ПО и работы по обновлению этого ПО требуют значительных трудовых и материальных затрат. В настоящий момент стоит вопрос о сокращении расходов на сопровождение используемых систем и увеличении скорости разработки и внедрения новых. Быстро меняющееся законодательство, экономические факторы часто требуют незамедлительного реагирования. Поэтому создаваемые ИС должны поддерживать возможность быстрого внесения изменений в бизнес-логику используемых программных комплексов. Один из возможных подходов к решению указанных проблем – отказ от применения ИС, основанных на архитектуре «толстого» клиента, и осуществление перехода на использование веб-технологий.

В качестве технологии, позволяющей ускорить процесс разработки новых ИС, предлагается использовать подход, основанный на моделировании. Предметные области создаваемых информационных систем описываются моделями высокого уровня абстракции, которые затем применяются для формирования внешнего вида клиентской части веб-приложения и генерации программного кода серверной части, определяющего бизнес-логику, статические и динамические структуры создаваемой системы.

В данной статье предлагается один из способов моделирования муниципальных ИС: с помощью специально разработанного для этих целей предметно-ориентированного языка программирования.

Структура комплекса муниципальных информационных систем

Если рассматривать направления в развитии ИС, которые используются в настоящее время в работе муниципальных органов власти и их подведомственных структур, то можно сказать, что в основном данные ИС оперируют «картотечной» информацией [1]. К их основным функциям относятся: ввод в систему данных об объекте и их редактирование; поиск сведений об объектах; создание разнообразных отчетов, основанных на информации, хранящейся в ИС, и т. д. Можно выделить несколько ключевых элементов интерфейса, встречающихся в большинстве подобных систем:

модуль отображения информации в виде карточки («имя атрибута» – «значение»);

модуль отображения информации в виде таблицы;

модуль отображения информации в виде различных формируемых отчетов;

компонент, ответственный за поиск информации в системе.

Также в некоторых муниципальных ИС могут

Рис. 1. Схема организации комплекса муниципальных информационных систем

использоваться различные специфические модули, например:

карта для отображения географической информации (например, в системах учета земельных ресурсов или адресного реестра);

модули для отображения информации в виде диаграмм, графиков;

компоненты для отображения графической информации (например, отображение сканированных копий документов).

Так как для среднего российского города (с населением более 100 тыс. человек) подобных ИС может насчитываться несколько десятков, и данные из этих ИС могут быть связаны между собой, то возникает потребность в обеспечении взаимодействия между ними.

Для того чтобы решить указанную потребность, все ИС должны строиться по единой методике с помощью одних и тех же средств проектирования и иметь стандартный общий вид ключевых элементов интерфейса. В программном комплексе муниципальных ИС (рис. 1) предлагается выделить две основные части: системную и функциональную [2].

Системная часть представляет собой базис программного комплекса – его ядро. Основной функцией ядра является интерпретация моделей конкретных подсистем, описываемых в функциональной части.

Функциональная часть комплекса состоит из трех основных компонентов.

1. Описание подсистем. В качестве описания подсистемы выступает набор метаданных, делящихся на следующие группы:

описание профилей и ролей пользователей;

структурного состава объектов ИС и связей между ними;

используемых источников данных;

описание способов отображения данных.

2. Программный код бизнес-логики, написанный на языках программирования, выполнение которых поддерживает ядро системы.

3. Источники данных.

В общем виде алгоритм работы комплекса муниципальных информационных систем можно описать следующим образом.

1. Пользователи взаимодействуют с комплексом через интернет-браузер: проходят регистрацию и в зависимости от назначенных профилей и ролей получают возможность работать с доступными для них ИС.

2. После того как пользователь запросил информацию по какому-либо объекту ИС, ядро системы выполняет выборку метаданных по данному объекту.

3. Затем ядро, определив требуемый источник данных и метод доступа к ним, вызывает этот метод.

4. После получения данных ядро на основе описанного в метаданных способа отображения формирует ответ клиенту.

Предметно-ориентированный подход к созданию муниципальных информационных систем

Ядро должно не только формировать пользо-

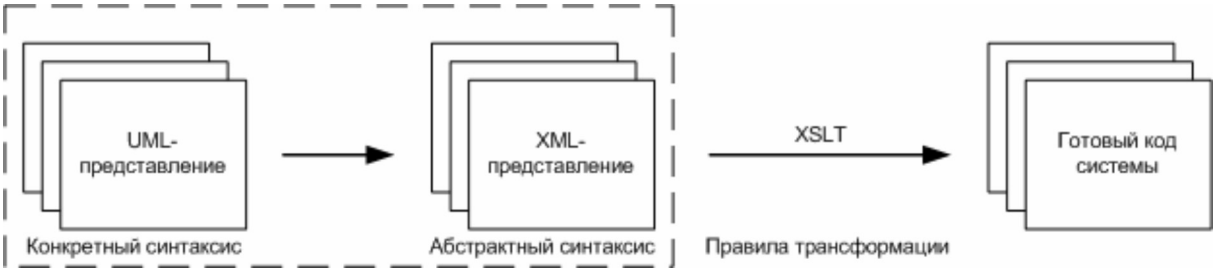


Рис. 2. Последовательность шагов моделирования и генерации ИС

вательский интерфейс приложения и организовывать доступ к данным, но и реализовывать функцию автоматизированной генерации рабочих ИС по создаваемым моделям. Так как модель должна отвечать и за внешний вид приложения, и за его бизнес-логику, то следует выбирать такой подход к разработке ПО на основе моделей, который обеспечит требуемый уровень абстракции модели и относительную простоту структуры метаданных.

В работе Е.В. Филичева и С.М. Устинова [3] рассмотрены основные подходы к технике разработки ПО на основе моделей, применяемые в настоящий момент. В качестве инструмента, с помощью которого можно создавать однотипные ИС, было принято решение использовать специально разработанный для таких целей предметно-ориентированный язык программирования (Domain-Specific Language, DSL).

Процесс создания DSL состоит из следующих этапов:

1) определение абстрактного синтаксиса;

2) определение конкретного синтаксиса;

3) определение правил трансформации.

Абстрактный синтаксис – это пригодный для машинной обработки вид, в котором описываются понятия DSL.

Конкретный синтаксис – это представление понятий абстрактного синтаксиса, которыми может манипулировать пользователь. Представление может быть текстовым, графическим или симбиозом обоих. В нашем случае будет использоваться представление в виде элементов UML (классов, ассоциаций и т. д.).

Правила трансформаций – это правила, по которым абстрактное представление транслируется в исполнимое представление. Так как в нашем случае в качестве абстрактного представления используются XML-файлы, то преобразование их содержания в исполняемый код может быть реализовано при помощи технологии XSLT (рис. 2).

Основой описания конкретного синтаксиса являются диаграммы классов, отражающих предметную область. Для того чтобы настроить стандартные элементы модели для выполнения конкретных задач по моделированию картотечных ИС, применен механизм UML-профилей и определены несколько новых UML-стереотипов для элементов модели:

классы прикладных объектов (класс со стереотипом «Object»);

классы, описывающие группы свойств прикладных объектов (стереотип «Properties»);

классы, описывающие поиски (стереотип «Search») и группы поисков (стереотип «Searches»);

классы, описывающие отчеты (стереотип «Report») и группы отчетов (стереотип «Reports»).

На рис. 3 приведен упрощенный фрагмент описания подсистемы «Аренда земельных участков». Класс «Договор аренды земельного участка» (далее – «Договор») имеет одну группу свойств в виде карточки и группу отчетов. Источниками данных для этого объекта предметной области выступают V_DOC_RENT и V_DOC_RENT_INF (в нашем случае это представления в базе данных). Атрибут «Арендатор» в группе свойств «Договора» является ссылкой на класс «Арендатор». Для того чтобы пользователь ИС имел возможность устанавливать связь между существующими в системе экземплярами «Договора» и «Арендатора», для класса «Арендатор» описывается поиск (в нашем случае в качестве поиска выступает параметризированный SQL-запрос, выбирающий данные из представлений V_RENTER и V_RENTER_INF).

Следующий этап разработки ИС – перевод диаграмм UML в XML-представление. Каждому элементу UML ставится в соответствие фрагмент XML-файла. Классы и ассоциации трансформи-

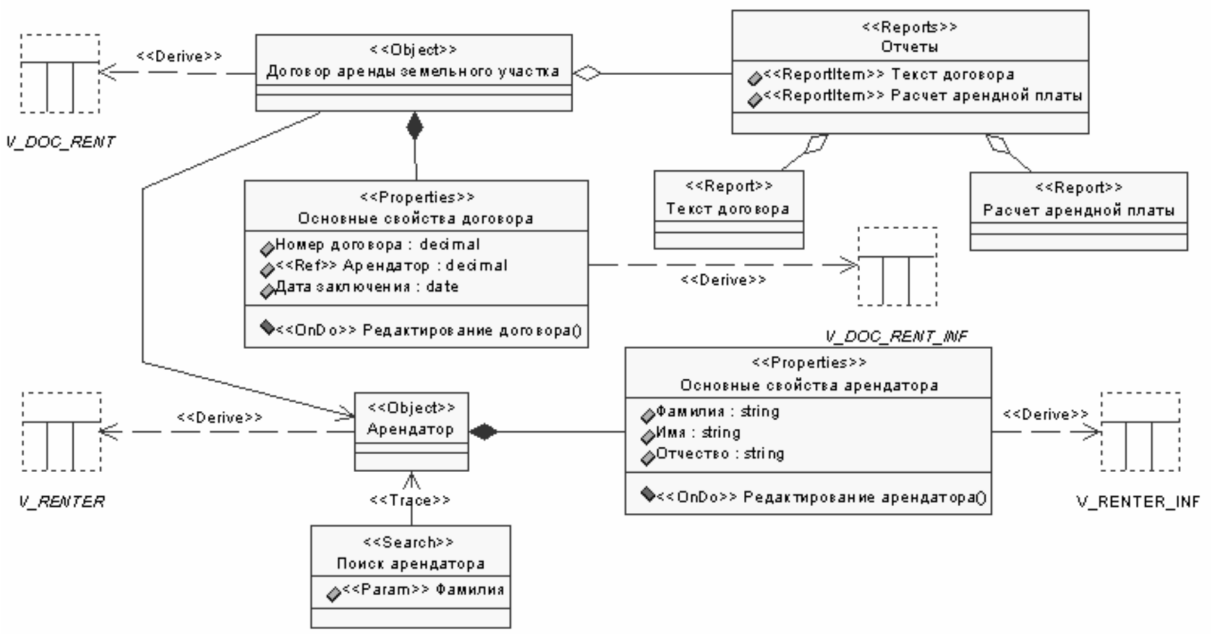


Рис. 3. Фрагмент описания подсистемы «Аренда земли»

руются в тэги, а свойства элементов модели – в атрибуты этих тэгов. В настоящий момент XML Schema, соответствующая XML-файлу, описывающему структурный состав объектов ИС и связей между ними, содержит описание порядка 40 элементов и 140 атрибутов. Более подробное описание соответствия между UML-элементами и элементами в XML-представлении рассмотрено в работе [4].

Следующий этап разработки ИС – генерация исполняемого кода из XML-представления. Основные подходы к генерации кода ИС рассмотрены в работах А.Н. Иванова [5] и А.А. Шалыто [6]. Так как в качестве источника данных для генерации используется XML-файл модели, то было принято решение использовать технологию XSLT. Процесс генерации кода на основе XSLT-преобразований более подробно рассмотрен в работе [7]. Для каждого конкретного языка программирования может быть создан специальный шаблон преобразования. Генератор выполняет следующие действия:

1) генерация таблиц и представлений БД;

2) хранимых процедур БД или программных модулей, написанных на языках программирования, выполнение которых поддерживает ядро системы;

3) шаблонов отчетов;

4) тестовых данных;

5) генерация профилей пользователей, позволяющих разделить права доступа к информации, хранящейся в ИС.

Внедрение и доработка картотечных информационных систем, спроектированных с применением DSL

Разработка языка моделирования картотечных ИС ведется с конца 2007 г. С 2010 г. в рамках развития муниципальной геоинформационной системы г. Череповца внедрено 5 ИС, при разработке которых использовались два подхода:

1. ИС полностью проектируется с помощью UML, а база данных и прикладной программный код генерируется на основе созданных моделей. Изменения, вносимые программистами в сгенерированный прикладной код бизнес-логики, имеют незначительный характер.

2. Структура базы данных и код бизнес-логики разрабатываются программистами самостоятельно, а модели используются для описания внешнего вида ИС и разделения прав доступа.

Первый подход выгодно применять, когда ИС разрабатывается «с нуля». Процесс разработки можно разбить на несколько итераций, на каждой из которых можно выполнить процесс генерации и получить работоспособный макет ИС. Плюсом данного подхода является еще и то, что если в ходе эксплуатации системы появ-

ляется потребность в расширении структуры и функциональности ИС, то моделирование дополнительных компонентов и их интеграция с ранее сгенерированной базой данных и программным кодом в ряде случаев не потребует значительных дополнительных затрат.

Второй подход применяется в том случае, если в работе создаваемой ИС будут использоваться базы данных, спроектированные для предыдущих версий данной системы. Преимущество данного подхода в том, что разработчики могут создавать более оптимизированные структуры баз данных, чем те, которые получаются в результате автоматической генерации. К недостатку подхода следует отнести то, что итеративный процесс разработки, применяемый в первом подходе, в данном случае требует большого объема ручного труда разработчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воробьева, М.С.** Математическое моделирование и технологии интеграции данных в учетных информационных системах: Дис. ... канд. техн. наук [Текст] / М.С. Воробьева. –Тюмень. –2006. –131 с.

2. **Григоров, Ант. С.** Создание информационных систем для муниципальных образований [Текст] / Ант. С. Григоров, Анд. С. Григоров // Информатизация процессов формирования открытых систем на основе СУБД, САПР, АСНИ и систем искусственного интеллекта (ИНФОС-2009): Матер. V Междунар. науч.-техн. конф. – Вологда: Изд-во ВоГТУ, 2009. –С. 85–88.

3. **Филичев, Е.В.** Разработка веб-приложений на основе моделей высокого уровня абстракции [Текст] / Е.В. Филичев, С.М. Устинов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№2. –С. 86–93.

4. **Григоров, А.С.** Предметно-ориентированный язык программирования для разработки информационных систем для муниципальных образований [Текст] / А.С. Григоров // Объектные системы – 2010 (Зимняя сессия): Матер. II Междунар. науч.-практ. конф.; Под общ. ред. П.П. Олейника. –Ростов-на-Дону, 2010. –С. 55–59.

5. **Иванов, А.Н.** Автоматизированная генерация информационных систем, ориентированных на данные: Дис. ... канд. физ.-мат. наук [Текст] / А.Н. Иванов. –СПб., 2005. –130 с.

6. **Шалыто, А.А.** Автоматическая генерация кода программ с явным выделением состояний [Текст] / А.А. Шалыто, С.Ю. Канжелев // Software Engineering Conf. – 2006: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. –М., 2006. –С. 60–63.

7. **Dodds, L.** Code generation using XSLT [Электронный ресурс] / IBM developerWorks: Ресурс IBM для разработчиков и IT профессионалов // Режим доступа: http://www.ibm.com/developerworks/xml/tutorials/x-codexslt/x-codexslt-pdf.pdf (дата обращения 04.10.2011)

УДК 004.89

А.Е. Васильев, А.В. Донцова, А.И. Мурго

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СРЕДСТВ НЕЧЕТКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Встраиваемые интеллектуальные системы управления (ВИСУ) имеют, как правило, иерархическую структуру, включающую исполнительный, тактический и стратегический уровни. Один из базовых математических аппаратов для встроенного программного обеспечения тактического и стратегического уровней ВИСУ – аппарат теории нечетких множеств [1]. При этом наиболее часто используемым классом аппаратных вычислительных средств для таких систем являются микроконтроллерные и микропроцессорные платформы.

С учетом сложности задач, решаемых на стратегическом и тактическом уровнях, и ограничениями на вычислительную производительность аппаратных платформ встраиваемых систем, особое внимание при проектировании следует уделять эффективности вычислений (в смысле минимиза-

ции времени вычислений и объема используемой памяти). Экстенсивные подходы к обеспечению роста производительности встраиваемой системы (основанные, например, на повышении тактовой частоты кристалла) приводят к ухудшению значений системообразующих характеристик встраиваемых систем (в частности, снижению надежности, повышению потребляемой мощности и др. [2]).

С учетом указанных выше особенностей алгоритмическое повышение производительности систем нечетких вычислений является актуальной задачей. В статье рассматриваются вопросы сравнительного анализа алгоритмических подходов к реализации подсистем нечеткой обработки информации; описан новый вариант алгоритма нечетких вычислений.

Для выполнения сравнительного анализа в качестве прототипа аппаратной платформы использован 8-битный нечеткий контроллер семейства ST5, относящийся к классу вычислителей ICU (Intelligent Control Unit) – лучших по производительности среди вариантов реализации систем нечеткой обработки данных.

Помимо традиционных компонентов, процессорное ядро микроконтроллера ST5 имеет в своем составе нечеткий вычислитель (Decision Processor), функционирование которого основано на использовании ресурсов процессорного ядра (в частности, АЛУ), что приводит к блокировке программных вычислений при выполнении команд нечеткой обработки данных и снижает производительность функционирования ВИСУ в целом.

Алгоритмическое повышение производительности нечетких ВИСУ

Таким образом, к основным направлениям повышения производительности ВИСУ с нечеткой обработкой данных относятся обеспечение независимости функционирования нечеткого вычислителя и АЛУ, а также оптимизация алгоритма нечетких вычислений.

Оценка качества реализации нечеткого вычислителя проводится в работе с применением триады показателей «точность вычислений – время вычислений – затраты памяти».

Для реализации наиболее высокоскоростных вычислений в авторском алгоритме (рис. 1) использован метод «просмотровых таблиц» («look-up tables»), оперирующий термами, заданными совокупностью массивов-векторов, и базой правил, заданной матрицей. Такая совокупность структур базы нечетких знаний дает (как будет показано ниже) значительный прирост производительности. Относительные затраты памяти, превышающие этот показатель для других алгоритмов, компенсируются возможностью задавать произвольную функцию принадлежности.

Приведем основные параметры алгоритма: число входных переменных – от 1 до 5; число выходных переменных – от 1 до 5; число правил – от 1 до 255; число термов на каждую лингвистическую переменную – от 1 до 10. Область допустимых значений каждой переменной – от 0 до 255. Термы хранятся в виде массива значений степени принадлежности, упорядоченного по возрастанию четкой переменной; при этом диапазон значений степени принадлежности [0..1] эквивалентирован диапазоном [0..255]; таким образом, например величина 0,9 будет эквивалентна коду 230 (рис. 2). При выполнении фаззификации соответствующий терму массив адресуется значением входной переменной, возвращая значение степени принадлежности данной переменной этому терму. При выполнении дефаззификации (в авторском варианте алгоритма для дефаззификации используется метод «среднее максимумов») для каждого массива, описывающего терм выходной переменной, будет дополнительно построен список максимумов путем поиска индекса, соответствующего максимальному значению степени принадлежности (для отрезка максимальных значений – горизонтального на графике – будет взята его середина).

База правил представляется таблицей; количество строк в ней соответствует количеству правил. Каждая строка состоит из пяти «входных» и пяти «выходных» столбцов.

«Входные» описывают номера термов входных переменных, участвующих в формировании условий данного правила, а «выходные» – номера выходов, вычисляемых при срабатывании условий данного правила (рис. 3). Так, правило $R1$, записанное в таблице, означает:

$$\text{ЕСЛИ } (X1=T_{X1r1}) \text{ И } (X3=T_{X3\,r\,1}) \text{ И } (X4=T_{X4\,r\,1}),$$
$$\text{ТО } (Y2=T_{Y2\,r\,1}) \text{ И } (Y3=T_{Y3\,r\,1}).$$

Подходы к оценке качества алгоритмов нечетких вычислений

При сравнении предлагаемого алгоритма и алгоритма платформы-прототипа необходимо учитывать способ их реализации: очевидно, что

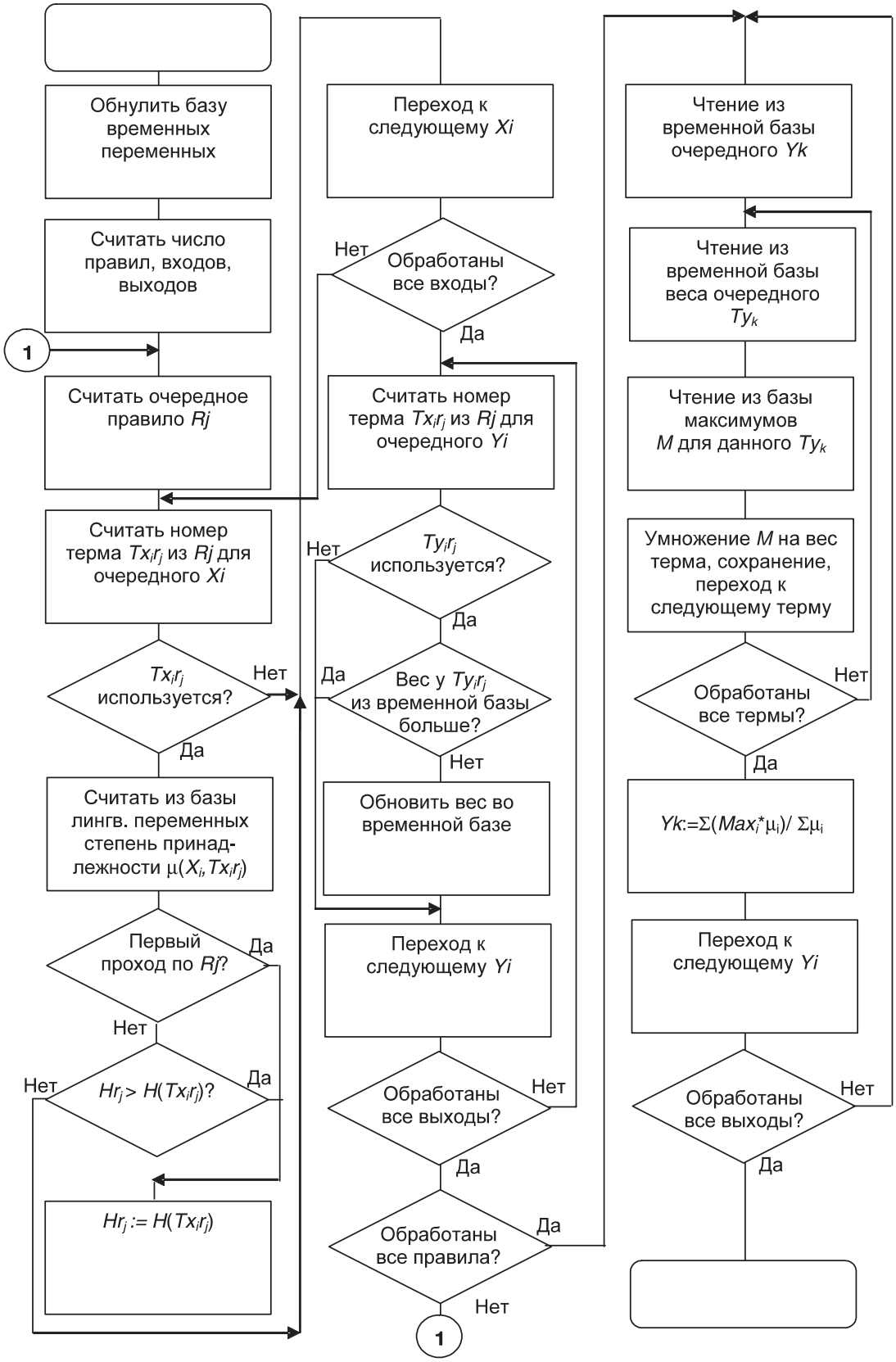


Рис. 1. Схема реализации нечетких вычислений

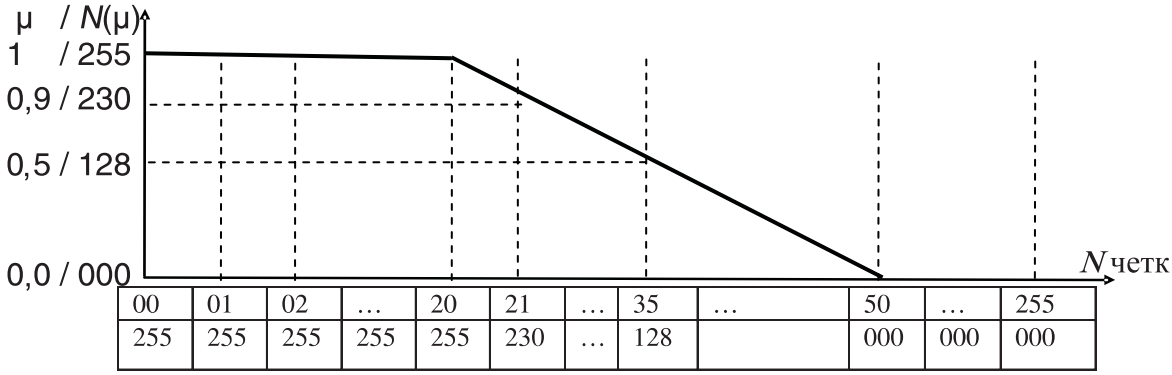


Рис. 2. Пример организации табличного хранения терма

аппаратная реализация по абсолютным значениям ряда приведенных выше показателей превзойдет программную, в связи с чем для показателей времени вычислений и объема памяти необходимо определить нормирующие значения или меру.

Такую меру можно ввести посредством элементарного вычислителя, положив, что его реализация занимает единичный квант памяти и требует единичного кванта времени на выполнение. В качестве такого элементарного вычислителя используем нечеткий вычислитель с одним входом, одним выходом, одним правилом и двумя термами.

В соответствии с общей методологией оценки сложности вычислений, изложенной, в частности, в [3], для измерения нормирующих коэффициентов по затратам времени (*Kt*) и памяти (*Km*) у сравниваемых алгоритмов, а также для подтверждения гипотез о характере взаимосвязей сложности нечеткой системы с затратами ресурсов на ее реализацию, проведен ряд экспериментов, в которых измерялись абсолютные величины времени обработки и требуемого объема памяти на реализацию нечетких систем с количеством правил от 1 до 255. Установлен линейный характер зависимости времени выполнения нечеткой обработки данных от количества правил, определены искомые коэффициенты (табл. 1).

Для осуществления сравнительного анализа точности вычислений по двум алгоритмам выполнены серии экспериментов для следующих классов нечетких вычислителей: «1 вход – 1 выход, линейная зависимость», «1 вход – 1 выход,

	X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
R1	Tx_1r_1		Tx_3r_1	Tx_4r_1			Ty_2r_1	Ty_3r_1		
…										
Rj		Tx_2r_j	Tx_3r_j				Ty_2r_j			
…										
Rn			Tx_3r_n	Tx_4r_n				Ty_3r_n		

Рис. 3. Пример задания базы правил

Таблица 1

Нормирующие коэффициенты элементарного вычислителя

	Kt	*Km*
Аппаратный вычислитель ST5	18	3
Программный вычислитель авторской разработки	400	256

а) *б*)

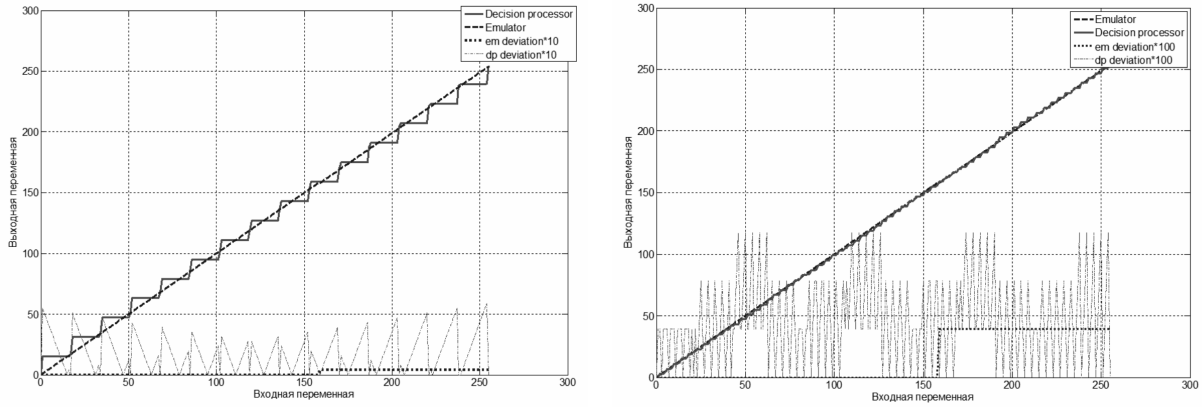


Рис. 4. Нечеткое вычисление линейной зависимости с использованием двух термов (*а*) и пяти термов (*б*)

нелинейная зависимость», «2 входа – 1 выход, нелинейная зависимость».

Полнота такого анализа следует из утверждения о том, что нечеткий контроллер произвольной сложности можно описать в виде сети элементарных контроллеров; полученные результаты могут быть экстраполированы на задачу нечеткой обработки данных любой сложности, как указывается, в частности, в [4].

Сравнительный анализ вариантов алгоритмических реализаций

Графики с результатами вычислений для первых двух классов вычислителей при различном количестве термов приведены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 для наглядности график погрешности вычислений приведен с коэффициентами 10 (для рис. 4 *а*) и 100 (для рис. 4 *б*).

Из приведенного выше очевидно, что при усложнении нечеткого контроллера повышается степень его соответствия исходной аналитической зависимости.

На рис. 6 показан пример нелинейной функции двух переменных, а на рис. 7 – результат нечеткого вычисления этой функциональной зависимости рассматриваемыми алгоритмами.

Таблица 2, содержащая числовые характеристики реализаций, представленных на рис. 5, наглядно демонстрирует полутора-двукратное превосходство предлагаемого алгоритма над прототипом по расходу памяти и времени, а также превосходство в скорости роста точности его вычислений при увеличении степени подробности описания реализуемой функции.

Рассмотрим также пример реализации системы сложной функциональной обработки данных на подлежащих сравнению нечетких вычислителях. В качестве примера выступает система предыскажений в тракте видеосигнала, рассмотренная в [5]: с целью повышения качества изображения

а) *б*)

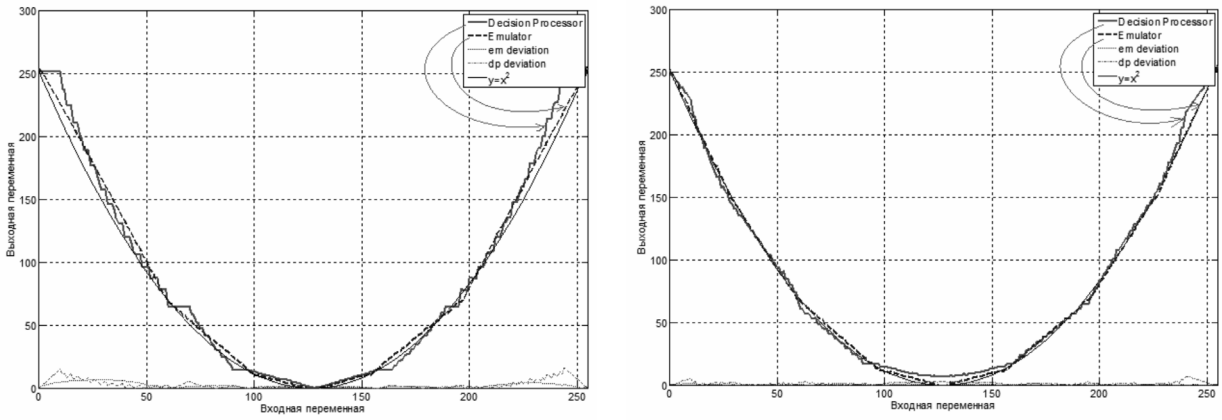


Рис. 5. Нечеткое вычисление нелинейной зависимости с использованием семи термов (*а*) и девяти термов (*б*)

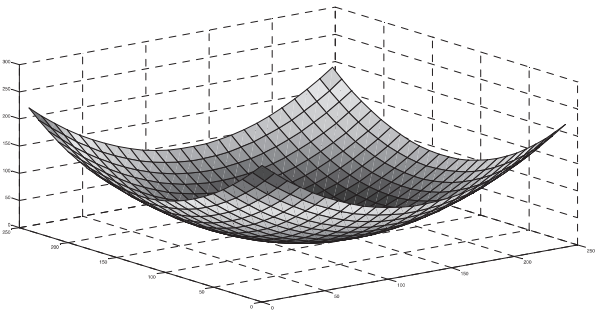
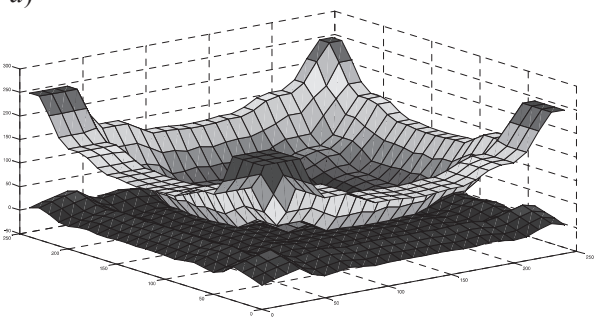


Рис. 6. Эталонная поверхность второго порядка

а)



б)

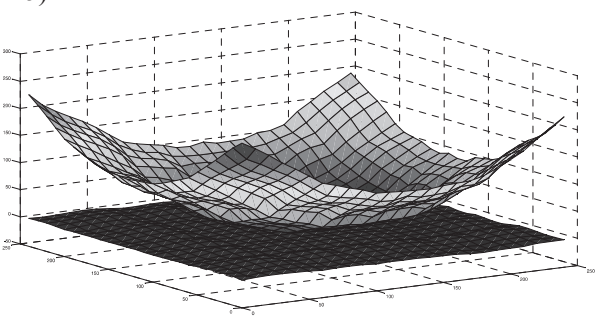


Рис. 7. Нечеткое вычисление нелинейной функции двух переменных:
а – аппаратным вычислителем;
б – авторским алгоритмом

предлагается использование структурной схемы, представленной на рис. 8 *а*. Для этого применяется специализированный видеопроцессор – решение, не обладающее сколько-нибудь существенными возможностями изменения функциональных характеристик и предопределенного способа обработки информации.

Использование нечетких методов обработки – альтернативное решение, обладающее большей универсальностью, настраиваемостью, возможностью перепрограммирования. Для сравнения вычислителей рассмотрим реализацию сложной функциональной зависимости, представленной на рис. 8 *б* под литерой «з».

Рисунок 9 демонстрирует преимущество авторского алгоритма, обеспечивающего отклонение от образцовой зависимости на величину не более единицы младшего разряда.

Обобщенные по приведенной выше триаде показатели качества функционирования сравниваемых алгоритмов демонстрируют диаграммы рис. 10: рис. 10 *а* показывает средние скорости вычислений этих алгоритмов при близких точностных характеристиках; рис. 10 *б* – среднюю точность вычислений при близких скоростях.

Представленные диаграммы наглядно демонстрируют превосходство предлагаемого авторами альтернативного алгоритма над алгоритмом нечетких вычислений ICU-микроконтроллера ST5.

Таким образом, предложены алгоритмические решения задачи реализации нечетких вычислений на встраиваемых платформах, обеспечивающие достижение значений показателей качества (по критериям скорости и точности вычислений), превышающих эти значения у известных реализаций.

Таблица 2

Сравнение числовых показателей нечетких реализаций вычислителей нелинейной функции

	Максимальная ошибка, %	Средняя ошибка, %	Относительные затраты памяти	Относительные затраты времени
Реализация квадратичной зависимости, семь термов				
Алгоритм ST5	16,1	3,0	18,7	3,3
Авторский алгоритм	6,8	2,2	7,1	1,9
Реализация квадратичной зависимости, девять термов				
Алгоритм ST5	7,2	1,6	24,0	4,0
Авторский алгоритм	1,8	0,7	9,1	2,1

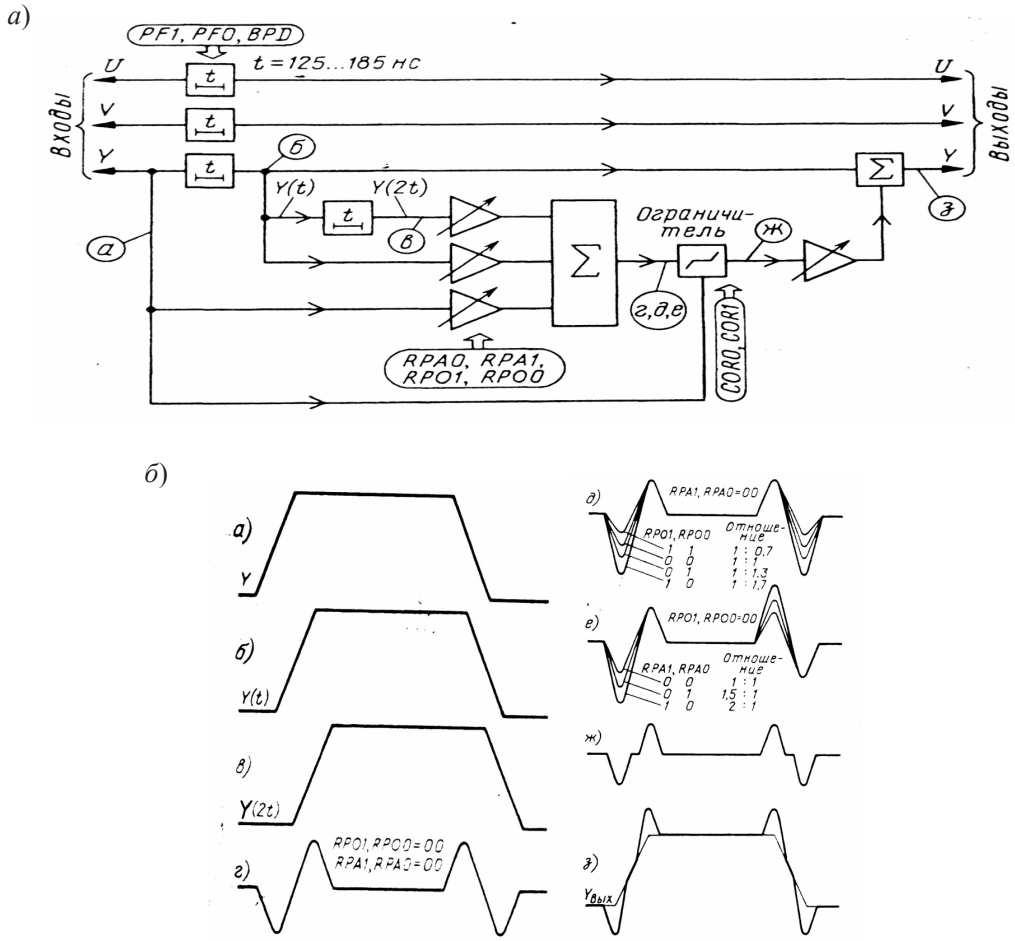


Рис. 8. Структурная схема преобразующего устройства (*а*), этапы преобразования (*б*)

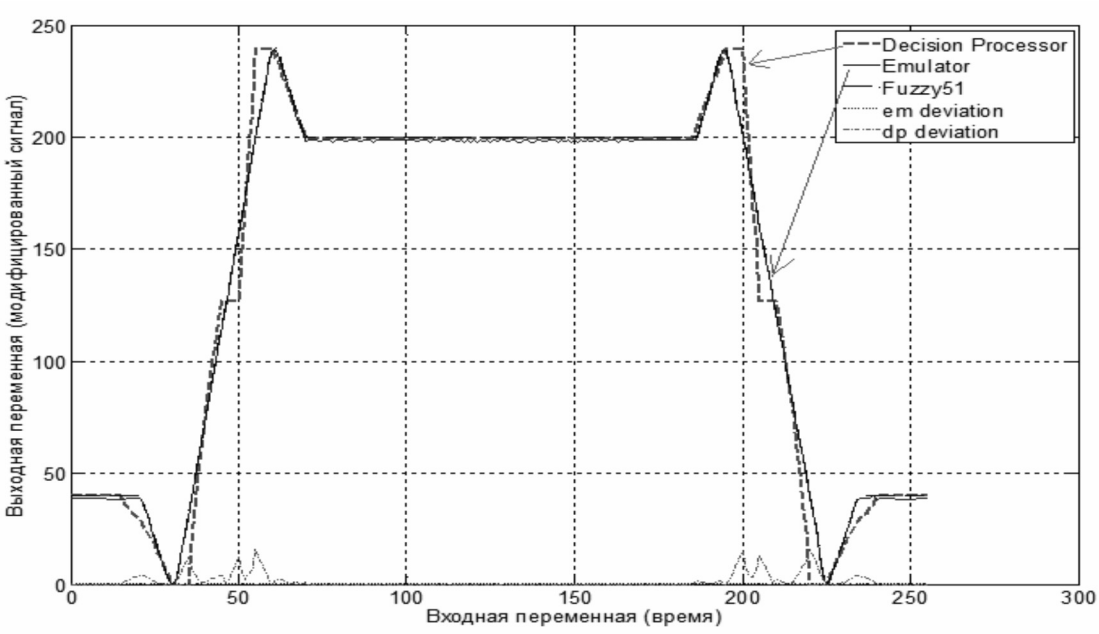


Рис. 9. Варианты реализации функции предыскажения

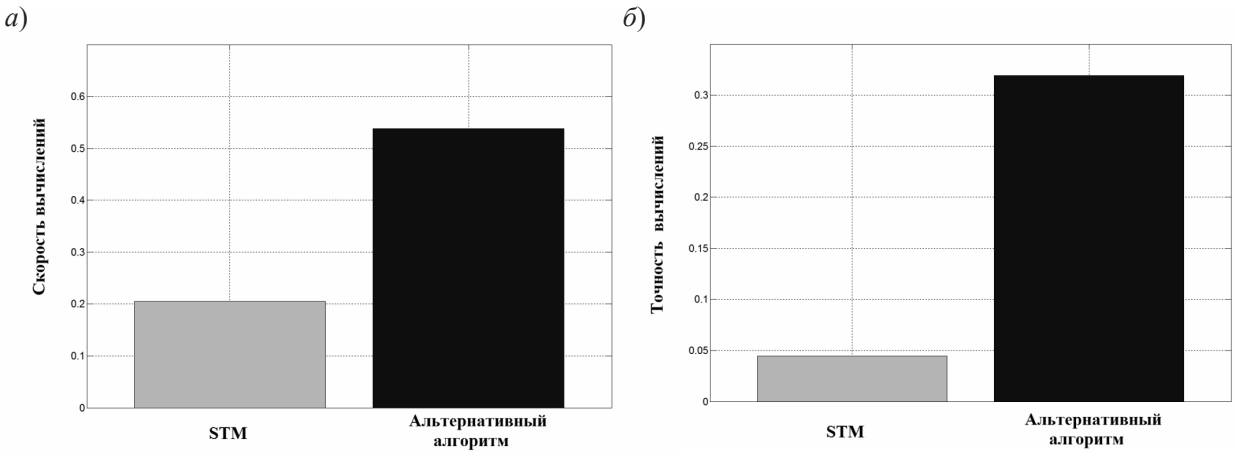


Рис. 10. Диаграммы сравнения реализаций: по скорости (*а*) и точности (*б*)

Характерной особенностью рассмотренного варианта алгоритмической реализации нечетких вычислений, отличающей его от известных, является принцип распределения памяти для хранения термов лингвистических переменных и базы правил, а также механизм доступа к ним, что позволяет существенно повысить скорость нечетких вычислений и предоставляет возможность выполнять операции с неограниченным разнообразием классов термов лингвистических переменных.

Предложенные решения пригодны как для программной, так и для аппаратной реализации на микросхемах программируемой логики.

Нисколько не отрицая достоинства и возможности чисто технологических улучшений, авторы обращают внимание читателей на возрастающую значимость системного подхода к проблеме повышения производительности, в особенности для предметной области ВИСУ.

Дополнительная информация о лаборатории ВИСУ и деятельности ее коллектива доступна в сети: http://aivt.ftk.spbstu.ru/education/labs/intelsys/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Джонс, М.Т.** Программирование искусственного интеллекта в приложениях [Текст] / М.Т. Джонс. –М.: ДМК Пресс, 2006. –312 с.

2. Highest MHz Does Not Mean Highest Performance [Text] / Tensilica White Paper. –24 Oct. 2008. –P. 1–8.

3. **Сэвидж, Дж.** Сложность вычислений [Текст] / Дж. Сэвидж. –М.: Факториал, 1998. –368 с.

4. **Кофман, А.** Введение в теорию нечетких множеств [Текст] / А. Кофман. –М.: Радио и связь, 1982. –432 с.

5. **Хохлов, Б.** Обработка сигналов YUV в однокристальном процессоре UOCIII [Текст] / Б. Хохлов // Радио. –2009. –№ 2. –С. 10–13.

УДК 004.932.72

И.И. Зиновьев, П.Ю. Шамин

ОБНАРУЖЕНИЕ ЛИЦ ЛЮДЕЙ В СИСТЕМАХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Поиск лиц людей на изображении применяется как в системах безопасности, так и в индустрии обслуживания и развлечения. Поэтому не удивительно, что на текущий момент предложены разнообразные варианты решения этой задачи. По результатам исследования, представленного в работе [4], можно сделать вывод, что наибольший интерес из открытых алгоритмов детектирования лиц людей на изображении представляет алгоритм, представленный в 2001 г. Полом Виолой и Майклом Джонсом [7].

Данный алгоритм успешно справлялся с задачей детектирования лиц людей в видеопотоке в реальном времени. Однако в связи с развитием

техники в современных системах видеонаблюдения все чаще используются камеры высокого разрешения, а это накладывает более жесткие требования на время его работы.

Рассмотрим основные способы решения данной проблемы.

1. Выделение части кадра для поиска лиц. Такой подход фактически не решает проблемы, но позволяет использовать существующий алгоритм при работе с кадрами видеопотока высокого разрешения.

2. Увеличение минимального размера искомого лица. Как известно, алгоритм Виола–Джонса работает по принципу «скользящего окна», т. е. последовательно анализирует все изображение участками определенного размера, равного размеру лица. Таким образом, чем больше размер искомого лица, тем меньше необходимо сделать итераций при анализе одного кадра. Недостаток такого подхода – исключение из рассмотрения части лиц, которые могут присутствовать в кадре.

3. Анализ цветовой информации изображения: выделение участков близких по цвету к коже людей [3]. Благодаря этому из рассмотрения обычно исключается значительная часть кадра, что приводит к ускорению анализа изображения. Но возможно ложное исключение участков, содержащих лица. Кроме того, использование цветного изображения сужает рамки применения такого подхода, поскольку многие видеокамеры, особенно высокочувствительные, предназначенные для работы в условиях низкой освещенности, дают только серое полутоновое изображение. Очевидно, что данный подход не применим и для работы с ИК-камерами и картинкой с электронно-оптических преобразователей (ЭОП).

4. Реализация параллельного алгоритма детектирования лиц людей на центральном процессоре (CPU) [2]. Получаем существенное ускорение алгоритма в зависимости от числа ядер у процессора. К недостаткам можно отнести небольшое число ядер у процессоров, что ограничивает максимально достижимое ускорение. Тем более что в реальной системе редко возможно выделение всех ядер центрального процессора (процессоров) для решения всего одной задачи.

5. Логическим продолжением предыдущего подхода является реализация параллельного алгоритма детектирования лиц людей на графической карте (графический ускоритель, GPU) [5]. Все современные видеокарты поддерживают ту или иную технологию GPGPU, позволяющую использовать графический процессор видеокарты для общих вычислений, которые обычно проводит центральный процессор.

В статье предлагается оригинальная реализация параллельного алгоритма Виола–Джонса для архитектуры NVIDIA CUDA.

Подходы к распараллеливанию алгоритма Виола-Джонса подробно рассмотрены в работе [5]. В данной статье также рассматривается вариант, в котором каждый поток анализирует свой участок изображения. Несмотря на свои недостатки, такой подход является самым простым для понимания и реализации, и, как будет показано далее, довольно эффективным на практике.

В качестве эталонной взята реализация алгоритма Виола–Джонса для CPU из открытой библиотеки OpenCV. Это позволило сохранить возможность использования каскадов классификаторов из этой библиотеки.

На рис. 1 приведена обобщенная блок-схема работы полученного алгоритма при анализе видеопотока. На первом этапе происходит загрузка каскада классификаторов в память графического ускорителя. Так как все потоки одновременно выполняют одинаковые этапы каскада, но для разных участков изображения, то его целесообразно разместить в константной памяти GPU. Это объясняется тем, что при одновременном обращении к одинаковым адресам данного вида памяти разными потоками достигается максимально эффективное ее использование. Но объем константной памяти ограничен 64 Кбайтами, поэтому формат хранения в памяти каскада классификаторов переработан, подобраны минимально возможные типы данных для хранения его параметров. После проведенных действий в константной памяти GPU возможно размещение каскада классификаторов, в состав которого входит до 2150 слабых классификаторов.

Следует заметить, что все буферы в памяти GPU выделяются один раз на этапе инициализации детектора, что немаловажно при обработке видеопотока. Анализируемое изображение копируется в текстурную память, что позволяет реализовать эффективный алгоритм его масштабирования с аппаратной билинейной фильтрацией.

На следующем этапе для разных масштабов изображения выполняется ядро детектирования (рис. 2). В процессе детектирования каждый поток сохраняет результат своей работы в выделен-

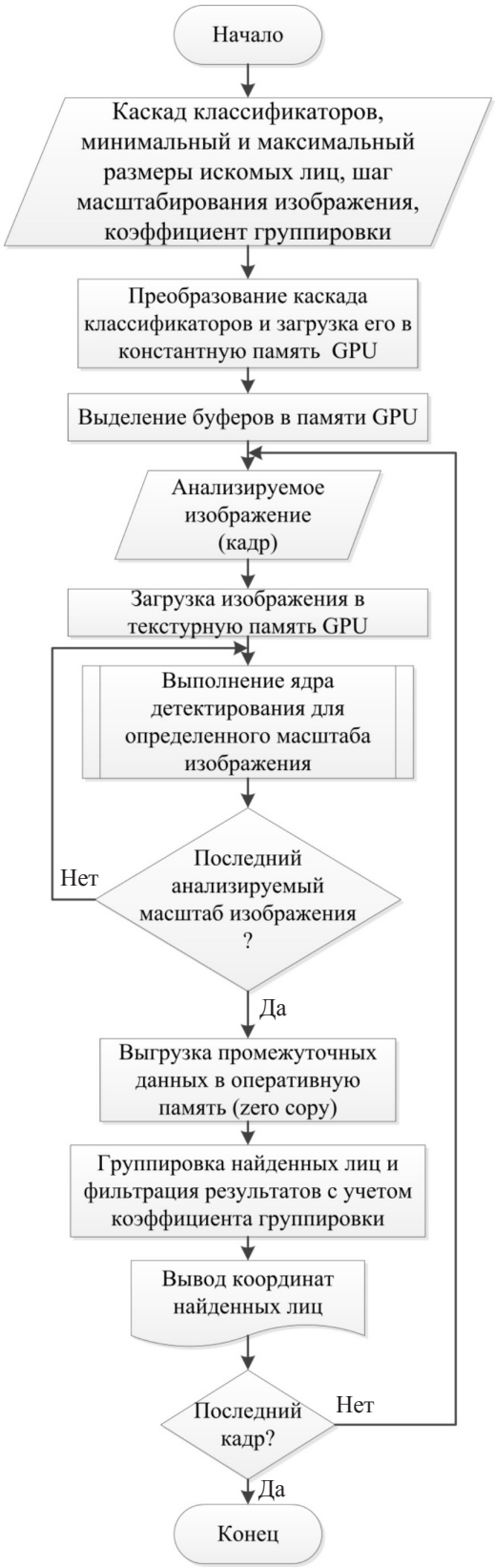


Рис. 1. Обобщенная блок-схема алгоритма

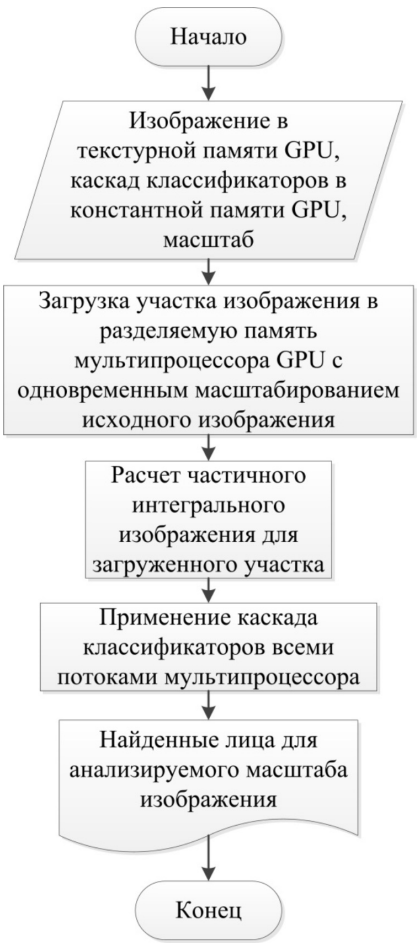


Рис. 2. Процесс «Выполнение ядра детектирования»

ную на этапе инициализации область глобальной памяти. Промежуточные данные накапливаются в памяти GPU. Для ускорения работы реализована их асинхронная загрузка в оперативную память компьютера (технология «zero copy»). После завершения анализа очередного кадра в оперативную память выгружаются все оставшиеся к этому моменту промежуточные результаты. Дальнейшая обработка полученных результатов, связанная с группировкой лиц, найденных в разных масштабах, производится на центральном процессоре. Такой подход позволяет минимизировать негативное влияние задержек, возникающих при пересылке данных между оперативной памятью и памятью графического ускорителя, на общее время работы алгоритма.

При разработке ядра детектирования была поставлена основная задача сделать работу мультипроцессоров видеокарты максимально независимой друг от друга, чтобы минимизировать

пересылку данных через медленную глобальную память. Для достижения поставленной цели в разделяемую память мультипроцессора из текстурной памяти считывается участок изображения, достаточный для обеспечения исходными данными всех его потоков. Размер участка зависит от выбранного размера блока потоков (обозначим его как $[Bx]\times[By]$) и размера окна детектирования, на которое натренирован каскад ($[Wx]\times[Wy]$) и равен $[Bx+Wx]\times[By+Wy]$ пикселей (рис. 3). Допустим, что $Bx = By = 16$, а $Wx = Wy = 20$, тогда потребуется всего $(16+20)\times(16+20)\times4 = 5184$ байта разделяемой памяти для обеспечения 256 потоков исходными данными.

Продолжением выбранного подхода стал отказ от вычисления интегрального изображения для всего кадра в целом. Так как цель – добиться независимой работы мультипроцессоров, было решено использовать «частичное интегральное изображение». Это означает, что производится вычисление независимых интегральных изображений для частей изображения уже размещенных в разделяемой памяти мультипроцессоров. Каждый мультипроцессор сначала выполняет суммирование своего участка изображения по строкам, затем – по столбцам. Такая реализация позволяет избежать лишних копирований в глобальную память, но имеет недостаток вычисления интегрального изображения для перекрывающихся участков изображения (см. рис. 3) несколько раз.

Описанные выше особенности реализации позволили значительно сократить число обращений к медленной глобальной памяти, что положительно отразилось на быстродействии алгоритма. Главный недостаток такого подхода – необходимость выполнения всех действий в рамках одного ядра. Это приводит к увеличению количества используемых регистров мультипроцессоров, что ограничивает число потоков, которые могут на нем выполняться. Частично проблема решается ограничением числа используемых регистров в опциях компилятора до 20 и подбором размера блока потоков. Экспериментальным путем установлено, что оптимальный размер блока потоков равен $16\times16 = 256$ потоков.

Предложенный алгоритм внедрен в аппаратно-программный комплекс автоматизированного распознавания и биометрической идентификации людей (АРБИЛ), разрабатываемый в рамках опытно-конструкторской работы по теме «Разработка технических средств распознавания образов по анализу видеоизображения для автоматизации работы оператора» [1].

В августе 2011 г. проведены испытания комплекса в реальных условиях метрополитена Санкт-Петербурга. В ходе эксперимента камеры размещались на турникетах и были настроены на съемку с разрешением 1920×1080 с частотой 12,5 кадров/с. Проводилась регистрация людей, проходивших через турникет. Параллельно обрабатывались три видеопотока. Эксперимент проводился в естественных условиях, никто из участников специально не останавливался и не смотрел в камеру. Следует отметить, что подаваемые на вход алгоритма кадры можно охарактеризовать, как имеющие сложный фон: наличие мелких дета-

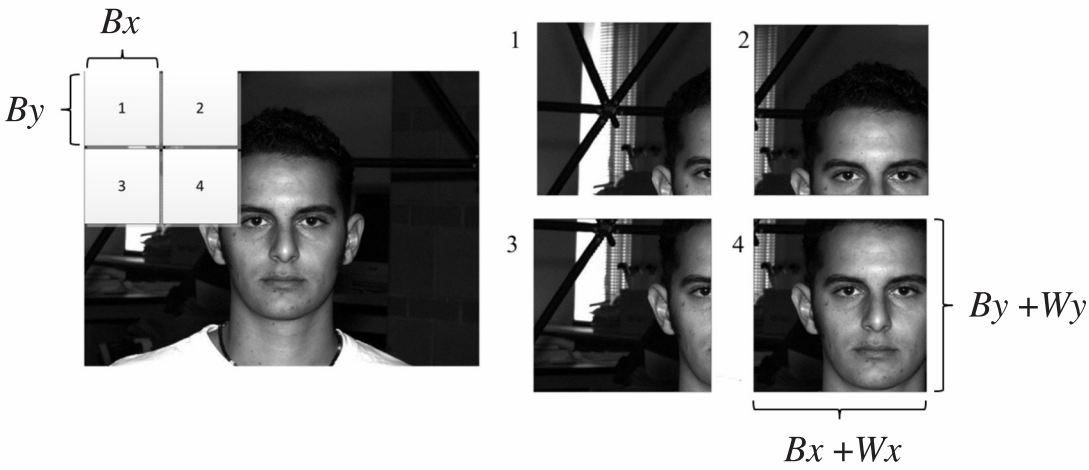


Рис. 3. Использование разделяемой памяти мультипроцессоров
Цифрами обозначены блоки потоков, для каждого блока показан участок изображения, загружаемый в разделяемую память соответствующего мультипроцессора

лей в поле зрения камеры, большой поток людей. Были возможны частичные перекрывания интересующих субъектов другими людьми, а также одновременное попадание в кадр нескольких из них. По результатам проведенного эксперимента отмечено 100 % детектирование лиц в зоне контроля и стабильное их сопровождение в реальном времени, т. е. алгоритм подтвердил возможность применения на практике в реальных условиях.

Для наглядной оценки скорости работы полученной реализации алгоритма (обозначим как gpu) проведем сравнение с многопоточными вариантами данного алгоритма, представленными в библиотеке OpenCV, как для центрального процессора (OCV-cpu), так и для графического ускорителя (OCV-gpu). Результаты сравнения приведены в таблице. Эксперимент состоит в следующем: один и тот же видеофайл продолжительностью 6 мин, полученный в ходе упомянутых выше испытаний, анализировался всеми вариантами алгоритма. Эксперимент проводился на компьютере, в состав которого входили два процессора Intel Xeon E5520 2.27 Ghz (в сумме 8 физических или 16 логических ядер) и видеокарта NVIDIA GTX 470 (448 CUDA-ядер). При этом фиксировались следующие показатели: минимальное T_{min}, максимальное T_{max} и среднее T_{avg} время, затраченное на анализ одного кадра, процент загрузки центрального процессора P_{cpu} и процессора графического ускорителя P_{gpu}, объем используемой оперативной памяти M_{cpu} и памяти графического ускорителя M_{gpu}. В ходе эксперимента для всех вариантов алгоритма были установлены следующие параметры: минимальный размер лица 20x20 пикселей, шаг масштабирования 1.2, коэффициент группировки 3, каскад классификаторов haarcascade_frontalface_alt2.xml из состава библиотеки OpenCV.

Видно, что относительно реализации на CPU удалось достичь ускорения в 6,2 раза. Это подтверждает целесообразность переноса процесса детектирования лиц людей на графический ускоритель, что освобождает центральный процессор

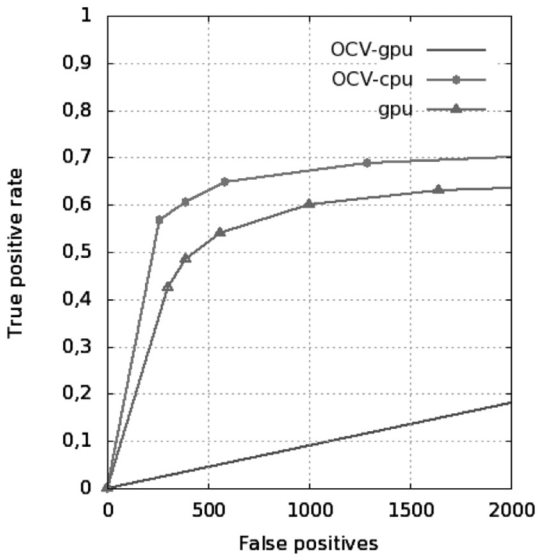


Рис. 4. Сравнение программных реализаций по базе FDDB (Discrete Score)

для выполнения других задач. Что касается сравнения с алгоритмом детектирования на графическом ускорителе, реализованном в OpenCV, то в данном случае предложенный алгоритм оказался в 2,8 раз быстрее. Также следует обратить внимание на более экономное расходование ресурсов графического ускорителя, позволяющее без существенных потерь запустить несколько процессов детектирования лица человека на одном GPU.

Сравнение эффективности работы рассмотренных выше программных реализаций алгоритма Виола–Джонса проводилось по относительному показателю положительных (True positive rate) и ложных (False positives) обнаружений при анализе изображений из базы «Face Detection Data Set and Benchmark» (FDDB) [6]. Особенность выбранной базы заключается в том, что собранные в ней изображения получены не в лабораторных условиях, т. е. условия съемки никто не контролировал. Поэтому возможно наличие нескольких лиц на одном изображении, частичные их перекрытия, различные ракурсы и повороты головы и даже отсутствие фокуса на некоторых изображениях.

Сравнительные характеристики разных реализаций алгоритма Виола–Джонса

Реализация	T_{min}, мс	T_{max}, мс	T_{avg}, мс	P_{cpu}, %	P_{gpu}, %	M_{cpu}, Мб	M_{gpu}, Мб
OCV-cpu	410,23	585,03	438,49	60	-	79,348	-
OCV-gpu	171,29	213,91	195,78	7	76	184,908	201
gpu	46,73	82,46	69,91	7	59	89,344	63

Разработанная авторами базы программа позволяет автоматизировать процесс тестирования алгоритмов детектирования лиц людей и получить стандартизованные графические результаты для их сравнения. В ходе эксперимента для алгоритма Виола–Джонса устанавливались параметры, аналогичные описанным выше, изменялся только коэффициент группировки в пределах от 1 до 7. Полученные результаты приведены на рис. 4.

Видно, что описанная в статье реализация алгоритма на GPU немного проигрывает своему аналогу на центральном процессоре по количеству обнаруженных лиц. Однако, как упоминалось выше, при анализе видеопотока в отличие от статичных изображений такой производительности детектора достаточно, чтобы не пропустить ни одного человека в зоне контроля. Полученные результаты демонстрируют, что предложенный подход к адаптации алгоритма Виола–Джонса для графического ускорителя применим на практике и успешно конкурирует с ранее описанными подходами.

В статье предложен оригинальный вариант алгоритма для детектирования лиц людей на изображении с использованием графических ускорителей. Данный алгоритм проверен на практике в реальных условиях и подтвердил свою работоспособность при анализе видеопотока высокого разрешения в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аракелян, С.М.** Аппаратно-программный комплекс автоматизированного распознавания и биометрической идентификации людей [Текст] / С.М. Аракелян, А.С. Голубев, А.В. Духанов [и др.] // Телематика'2010: Тр. XVII Всерос. науч.-метод. конф. –2010. –С. 253–254.
2. **Квасов, Д.С.** Обнаружение и идентификация лиц на растровом изображении с применением метода Виолы и Джонса [Текст] / Д.С. Квасов, И.И. Зиновьев, И.Г. Кокорин [и др.] // Телематика'2010: Тр. XVII Всерос. науч.-метод. конф. –2010. –С. 253–254.
3. **Кудряшов, П.П.** Быстрый поиск человеческих лиц на изображениях [Текст] / П.П. Кудряшов, С.А. Фоменков // Вестник компьютерных и информационных технологий. –2007. –№7. –С. 14–17.
4. **Degtyarev, N.** Comparative Testing of Face Detection Algorithms [Текст] / N. Degtyarev, O. Seredin // In Proc. ICISP. –2010. –P. 200–209.
5. **Hefenbrock, D.** Accelerating Viola-Jones Face Detection to FPGA-Level Using GPUs [Текст] / D. Hefenbrock, J. Oberg, N. Thanh [et al.] // In Proc. FCCM. –2010. –P. 11–18.
6. **Jain, V.** FDDB: A Benchmark for Face Detection in Unconstrained Settings. [Электронный ресурс] / V. Jain, E. Learned-Miller // Technical Report UM-CS-2010-009. –Dept. of Computer Science, University of Massachusetts, Amherst, 2010.
7. **Viola, P.** Robust real-time face detection [Текст] / P. Viola, M. Jones // International J. of computer vision. –2004. –Vol. 57 (2). –P. 137–154.

УДК 004.056.53

И.Ю. Брык, Д.В. Кетов, С.В. Купреенко

ДИНАМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ ПРОГРАММ И ПРОЦЕССОВ МЕЖСЕТЕВЫХ ЭКРАНОВ

На современном этапе развития информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) проблемы обеспечения информационной безопасности особо актуальны. Возрастающая сложность программных приложений, которые все чаще приобретают распределенный характер, не позволяет эффективно контролировать процессы, происходящие в компьютерной системе. В этих условиях концепция безопасности «разрешено все, что не запрещено» становится неэффективной, т. к. для современных информационных систем и распределенных вычислительных систем объем понятия «не запрещено» критически возрастает и динамически изменяется. Компьютерная система как часть сетевой среды становится уязвимой перед процессами, порождаемыми различными приложениями в рамках информационного взаимодействия. Наличие уязвимостей

в системе защиты как отдельных компьютеров, так и корпоративных информационных систем, привело к развитию подпольного бизнеса создателей различных вирусов и инфраструктуры для их организованного распространения с помощью компьютеров – «зомби», разрушительные ресурсы которых могут активизироваться в случайные или заранее выбранные моменты времени.

В связи с этим особую актуальность приобретают задачи разработки технологий информационной безопасности отвечающих принципу: «запрещено все, что не разрешено явно». В рамках данного принципа в статье развивается подход, направленный на повышение эффективности использования межсетевых экранов за счет их защиты от атак и неавторизованных воздействий с помощью системы контроля целостности программ и процессов, используемых для фильтрации трафика.

Целостность программ и процессов

Понятие целостности процесса не является строго определенным, как и понятия ее статического и динамического контроля. Стандарты [1, 2] определяют *целостность ресурсов информационной системы* как такое состояние ресурсов информационной системы, при котором их изменение осуществляется только преднамеренно субъектами, имеющими на него право, при этом сохраняются их состав, содержание и организация взаимодействия.

В силу того, что операционная система межсетевого экрана является частным случаем информационной системы, а ее программы и процессы – частным случаем ее ресурсов, то понятия целостности программ и процессов считаются определенными.

Статическая целостность. Анализ нормативных документов, предъявляющих требования к межсетевым экранам, показывает, что под статическим контролем целостности понимается однократный анализ (на этапе запуска и/или загрузки в процесс) неизменности байтового набора программ (исполняемых файлов и динамических библиотек) на основе сверки вычисляемых значений контрольных сумм этого набора с хранимыми эталонными значениями.

Динамическая целостность. Под динамическим контролем целостности в нормативных документах понимается анализ целостности процессов во времени при их функционировании.

Контроль целостности. Следует уточнить, что рассматриваемые далее механизмы обеспечения контроля целостности рассматривают понятие *контроля* (не ограниченное ни стандартами, ни нормативными документами) в двух смыслах:

проактивные механизмы, направленные на предотвращение нарушения целостности программ и процессов;

реактивные механизмы, направленные на своевременное обнаружение нарушений целостности программ и процессов.

Известные результаты анализа нарушений целостности программ и процессов показывают, что существует три причины, по которым может наблюдаться изменение состава, содержания и/или организации взаимодействия программ и процессов:

отсутствие в операционной системе МЭ исходных средств реализации КЦ и ИПС, например механизмов дискреционного и/или мандатного разграничения доступа;

некорректность параметров конфигурации МЭ, установленных системным администратором;

наличие ошибок в ядре операционной системы МЭ и прикладных программах и библиотеках.

Третья причина является в задаче контроля целостности определяющей потому, что заранее неизвестно где и при каких обстоятельствах ошибка в программах системы может привести к нарушению ее целостности, поэтому эту предпосылку при выборе механизмов контроля целостности необходимо считать первичной, т. к. широко известно [3, 4], что именно ошибки в программах приводят к нарушению целостности как в смысле изменения сегментов данных программ, так и в смысле изменения ее сегментов кода, что приводит к несанкционированному изменению содержимого и выполнению несанкционированного кода (изменение организации взаимодействия программ и процессов) соответственно.

Анализ предметной области и известных решений

Поиск и анализ известных и реализованных на практике [3, 4] решений и их свойств показал, что один из самых эффективных проактивных способов контроля целостности процессов – принцип W^X, исключающий возможность изменения (записи, Write) в исполняемые страницы памяти процесса, подлежащие исполнению (eXecute), и исключающий возможность исполнения страниц

памяти процесса, подлежащих записи. Такой механизм позволяет эффективно защищать сегмент кода процесса и данных, доступных для чтения, от модификации вообще (и, как следствие, запуска чужеродного кода), сегмент стека от запуска чужеродного кода, но не решает задач противодействия модификации несанкционированным образом, сегментов стека, данных, доступных для чтения и записи, и кучи.

Случайные сдвиги адресного пространства – еще один проактивный механизм, предлагающий случайное размещение программных объектов в памяти процесса, нарушение целостности которых является целью злоумышленника.

Среди реактивных способов контроля целостности известен механизм размещения в стеке и/или куче так называемых *canary words* – контрольных закладок непосредственно перед выполнением контролируемых функций и проверке значения закладок после возврата из них.

Таким образом, для динамического контроля целостности процесса в проактивном смысле эффективно могут быть использованы такие известные механизмы, как W^X и случайные сдвиги адресного пространства, а в реактивном – контрольные закладки.

В работе [3] описывается механизм *проверки контрольных сумм* файлов программных средств, загружаемых в процесс при запуске программы и/или загрузке динамической библиотеки, что может быть использовано для статического контроля целостности.

Модель целостности программ и процессов

Для уточнения понятия целостности программ и процессов во времени и его формализации необходимо более детально рассмотреть процедуры, происходящие при запуске программы, ее превращении в процесс, функционирования самого процесса во времени взаимодействия программы, выполняющейся в процессе с ресурсами операционной системы.

На рисунке изображена процедура загрузки секций программ (исполняемых файлов и динамических библиотек) в сегменты виртуальной памяти процесса, при этом можно семантически выделить несколько классов внутренних объектов программы и процесса:

НИ – класс неизменяющихся объектов – секций и сегментов;

И – класс изменяющихся объектов – секций и сегментов;

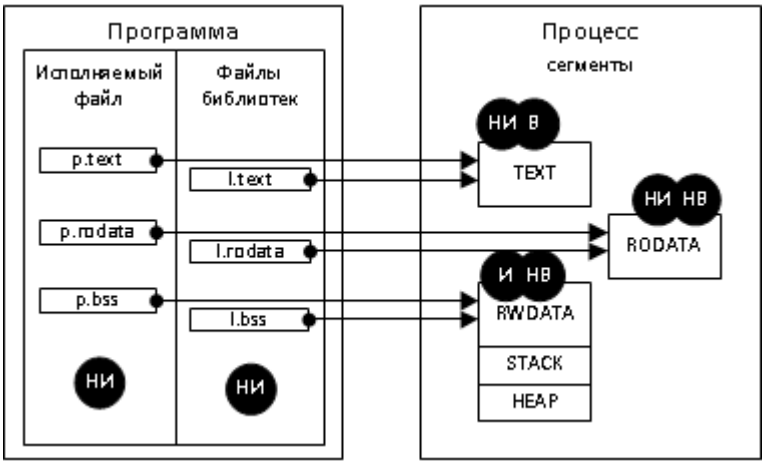
НВ – класс невыполняющихся объектов – секций и сегментов;

В – класс выполняющихся объектов – секций и сегментов.

В силу определений целостности как требования к сохранению организации взаимодействия для процессов это приводит к требованию сохранения принадлежности объекта к своему классу.

Для класса неизменяющихся объектов (секций программ и сегментов процесса), динамический контроль целостности может быть осуществлен так же, как и статический контроль – проверкой значений вычисляемых контрольных сумм их байтового набора с хранимыми эталонами, производимой в определенные моменты времени или с определенной периодичностью.

Для изменяющихся объектов, например сегментов кучи (HEAP) и стека (STACK) вычислять



Процедура загрузки секций программ в сегменты визуальной памяти процессора

контрольные суммы полного байтового набора сегмента не имеет смысла, поэтому необходимо контролировать (в определенные моменты времени или с определенной периодичностью) различные подмножества полного байтового набора по отдельности, адекватно их смысловому назначению во времени.

После загрузки программы и ее библиотек в процессе начинает выполняться одна или несколько параллельных или псевдопараллельных последовательностей инструкций – потоков (нитей), которые без контроля со стороны операционной системы (и, как следствие, без участия механизмов дискреционного и/или мандатного разграничения доступа) имеют прямой и неконтролируемый доступ к любым байтам виртуальной памяти всего процесса, но не имеют прямого доступа к любым ресурсам операционной системы – файлам, другим процессам и т. д.

Для доступа к ресурсам используется интерфейс и механизм системных вызовов, на уровне которого и размещается (дискреционный и/или мандатный) контроль доступа потоков к внешним ресурсам, выполняющийся в процессе программы.

Основные типы атак [3, 4] направлены на выполнение несанкционированного кода (путем изменения сегмента текста TEXT или путем выполнения сегментов стека STACK или кучи HEAP) и на подмену (изменение байтовых наборов в памяти сегментов стека STACK, данных RWDATA или кучи HEAP) имен (идентификаторов) ресурсов, к которым атакуемый доверенный процесс имеет санкционированный доступ, или на подмену адресов возврата из подпрограмм (в памяти сегмента стека STACK) для выполнения санкционированного кода процесса с нужными параметрами.

В любом случае успешность атаки определяется возможностью обратиться от лица доверенного процесса к ресурсам операционной системы посредством системного вызова с набором параметров, интересующих злоумышленника.

Таким образом, процесс $Ps = \langle S, D \rangle$ может быть представлен как совокупность наборов изменяющихся D, неизменяющихся S объектов – сегментов памяти.

Для набора неизменяющихся сегментов $S = \langle S_{rodata}, S_{text} \rangle$ его целостность может определяться как $I_S = I_{rodata} \wedge I_{text}$, где $I_i \triangleq (f_{sum}(S_i) = \varepsilon_i$ – целостность сегмента i; $f_{sum}(\cdot)$ – функция расчета контрольной суммы байтового набора сегмента S_i; ε_i – хранимый эталон контрольной суммы байтового набора сегмента S_i.

Для набора изменяющихся сегментов $D = \langle D_{rwdata}, D_{sackt}, D_{heap} \rangle$ целостность может определяться как $I_D = I_{rwdata} \wedge I_{stack} \wedge I_{heap}$, где $D_i = \langle b_1, b_2, ..., b_{n^i} \rangle$; b_j – контролируемое подмножество полного байтового набора сегмента D_i; n^i – количество контролируемых подмножеств сегмента D_i; $I_i \triangleq \wedge_{j=1...n^i} f^j_{ctrl}(b_j)$ – целостность сегмента D_i; $f^j_{ctrl}(\cdot)$ – логическая функция контроля байтового подмножества b_j.

Одновременно с этим, процесс $Ps = \langle E, N \rangle$ может быть представлен как совокупность наборов исполняющихся E и невыполняющихся N объектов – сегментов памяти.

Для набора исполняющихся сегментов $E = \langle S_{text} \rangle$ его целостность может определяться как $I_E = f_x(S_{text})$, где $f_x(\cdot)$ – логическая функция контроля выполняемости сегмента S_i.

Для набора невыполняющихся сегментов $N = \langle S_{rodata}, D_{rwdata}, D_{stack}, D_{heap} \rangle$ целостность может определяться как $I_N = \neg f_x(S_{rodata}) \wedge \neg f_x(D_{rwdata}) \wedge \neg f_x(D_{stack}) \wedge \neg f_x(D_{heap})$.

Целостность всего процесса тогда будет определяться логическим выражением

$$I_P = I_S \wedge I_D \wedge I_E \wedge I_N.$$

Вычисление всех компонент логического выражения, определяющих целостность процесса, нужно производить не чаще, чем при входе в любой системный вызов операционной системы.

Постановка задачи

Учитывая все сказанное выше, задача контроля целостности программ и процессов может быть сформулирована следующим образом.

Для контроля целостности необходимо реализовать

1. Проактивные механизмы:

• невозможность *модификации* вообще или несанкционированными субъектами (например, потенциально возможным, но чужеродным и несанкционированным кодом внутри процессов) содержимого файлов программных средств (программ и библиотек) и исполняющихся процессов;

• невозможность *запуска* потенциально возможного, но чужеродного и несанкционированного кода внутри исполняющегося процесса.

2. Реактивные механизмы:

• статический контроль целостности:

Меры обеспечения динамического контроля целостности

Нормативные требования	Меры обеспечения
Контроль целостности (исполняемых файлов-источников программ)	Подсчет *средствами разработки* [3] контрольных сумм секций исполняемых (ELF) файлов-источников и цифровое подписывание файлов-источников ключом разработчика
Контроль целостности статический (программ при загрузке и запуске)	Проверка *модулем ядра* [3] валидности контрольных секций исполняемых ELF файлов-источников и валидация цифровых подписей разработчика при загрузке в память процесса
Контроль целостности динамический (процессов операционной системы)	Проверка *модулем ядра* валидности контрольных сумм сегмента текста (программного кода) процесса перед системными вызовами и при переходах процесса в состояние готовности
Изолированная программная среда, контроль запуска явно разрешенных программ (исполняемых файлов-источников)	Мандатное разграничение доступа. MAC, Mandatory Acess Control на основе каркаса (framework) TrustedBSD [5] и при помощи *модуля ядра*, разрешающего запуск программ с верной контрольной суммой и цифровой подписью разработчика
Изолированная программная среда, контроль запуска явно разрешенных программ (машинного кода)	Применение принципа W^X (Write исключает eXecute) [4], запрещающего выполнять модифицированные страницы памяти и писать в исполняемые страницы памяти, что исключает исполнение зловредного «кода-из-данных»

обнаружение несанкционированной модификации файлов программных средств (программ и библиотек) при их загрузке в процесс;

- динамический контроль целостности:

обнаружение несанкционированных изменений содержимого исполняющегося процесса;

обнаружение несанкционированного запуска чужеродного кода в исполняющемся процессе.

Оценка предлагаемого решения

Для получения общего решения и интегрального эффекта по обеспечению контроля целостности процессов операционной системы межсетевого экрана предлагается реализовать известные, указанные выше механизмы: W^X и проверку контрольных сумм помещаемых в процесс программ и библиотек – в ядре операционной системы МЭ, контрольные закладки и контрольные суммы – в инструментарии разработчика (компиляторе в частности) программ для операционной системы МЭ ввести дополнительный механизм динамического контроля целостности исполняющихся процессов операционной системы МЭ: реализовать проверки *модулем ядра* операционной системы валидности контрольных сумм сегмента текста (программного кода) процесса перед выполнением системных вызовов (табл.)

В статье рассмотрен новый подход к решению задачи обеспечения безопасности функционирования межсетевых экранов (МСЭ) на основе контроля целостности программ и процессов. Построена модель динамической целостности программ и процессов, учитывающая их внутренние свойства и взаимодействие с внешними ресурсами операционной системы.

Произведена формализация задачи обеспечения динамической целостности, предложены способы реализации статического и динамического контроля целостности, основанные на проактивных и реактивных механизмах уровня ядра встроенной в МСЭ операционной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационные технологии. Основные термины и определения в области технической защиты информации [Текст] / Р 50.1.053-2005 Рекомендации по стандартизации. –М.: Стандартинформ, 2005.

2. Техническая защита информации. Основные термины и определения [Текст] / Р 50.1.056-2005 Рекомендации по стандартизации. –М.: Стандартинформ, 2006.

3. **Gelbart, Olga.** SPEE: A Secure Program Execution Environment Tool Using Static and Dynamic Code Verification [Электронный ресурс] / Olga Gelbart, Bhagirath Narahari, Rahul Simha // J. of High Speed Networks. –2006. –Vol. 15. –№ 1. –P. 21–32. –Режим доступа: http://www.seas.gwu.edu/~simha/research/spee_journal.pdf (дата обращения 01.11.2011)

4. **Theo de Raadt.** Exploit Mitigation Techniques [Электронный ресурс] / de Raadt Theo // AUUG 04, 2004. –Режим доступа: http://openbsd.org/papers/auug04/index.html (дата обращения 01.11.2011)

5. TrustedBSD Mandatory Access Control (MAC) Framework [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.trustedbsd.org/mac.html (дата обращения 01.11.2011)

УДК 681.3.016

С.В. Мещеряков, В.М. Иванов, Д.Е. Бортяков

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЧЕТА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Проблема морального и физического износа основных производственных фондов актуальна для многих российских предприятий, не имеющих достаточно средств на модернизацию и техническое перевооружение. По сведениям о сроках эксплуатации грузоподъемного оборудования (ГПО) [4], его средний возраст превышает 25 лет. Такому ГПО нужен частый ремонт и регулярное техническое освидетельствование (ТО), которое выполняется не только службой технадзора на предприятии, но и специализированными экспертными организациями в соответствии с нормативными документами Ростехнадзора [1–3]. Периодичность ТО составляет не реже трех лет и напрямую зависит от фактического срока службы ГПО и интенсивности его эксплуатации.

В целях автоматизации учета технического состояния ГПО разработана информационная система (ИС), ядром которой является интегрированная база данных (БД), где хранятся технические паспорта ГПО различных предприятий, вся история проведенных ТО (первичных и повторных), акты комплексного обследования, дефектные ведомости.

Структура интегрированной БД ГПО

Проект интегрированной БД ГПО разработан на основе структурного анализа, приведенного в [5], с использованием методов организации иерархии данных, описанных в работе [6]. Укрупненная структура БД показана на рис. 1. В ее состав входят следующие сведения:

электронные паспорта объектов обследования, включая технические характеристики ГПО, крановых путей, отдельных механизмов и других входящих в их состав иерархических элементов (Passport);

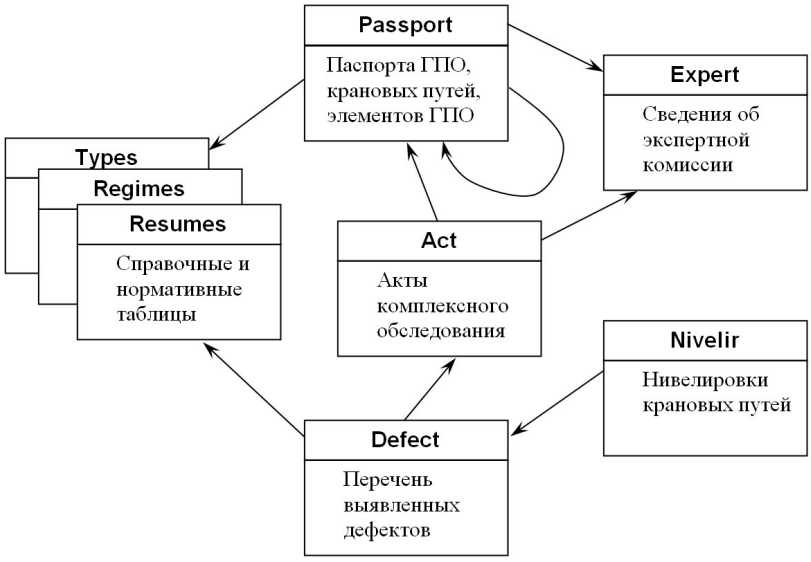


Рис. 1. Укрупненная структура БД ГПО

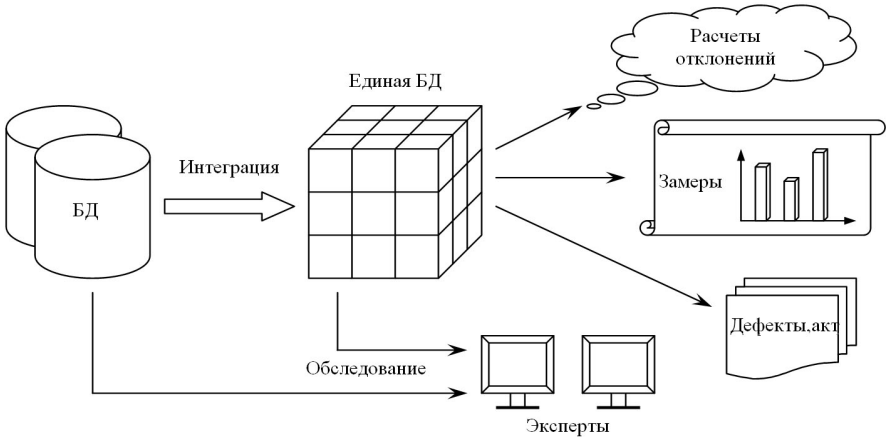


Рис. 2. Архитектура ИС учета технического состояния ГПО

сведения о специализированных организациях и экспертных комиссиях по комплексному обследованию ГПО, в т. ч. копии удостоверений и лицензионных документов (Expert);

результаты измерения отклонений крановых путей от предельно-допустимых значений согласно нормативам [1, 2] для каждого типа ГПО и вида нивелировки, где на практике бывает до 150 точек замеров (Nivelir);

информация о проведенных ТО с актами комплексного обследования и дефектными ведомостями (Act);

перечень выявленных дефектов с указанием элемента ГПО, методов и срока устранения (Defect);

справочные таблицы типов ГПО (Types), режимов работы крана (Regimes), типовых методов устранения дефектов (Resumes) и др.

В таблице Passport реализована реляционная связь типа «петля», позволяющая хранить информацию о паспортных параметрах не только ГПО разного типа, но также их составных элементов, образующих в совокупности иерархию данных, так называемое *дерево объектов* [6]. В подструктуре таблиц Nivelir-Defect-Act-Expert хранятся сведения обо всех проведенных ТО. Преимуществом такой организации БД является интеграция характеристик всех видов оборудования различных предприятий, выполненных мероприятий ТО и текущего состояния объектов ГПО в единой системе накопления и анализа информации.

Архитектура ИС учета технического состояния ГПО

Автоматизированная ИС учета технического состояния ГПО включает следующие подсистемы (рис. 2):

учет электронных паспортов ГПО, включая характеристики крановых путей и других элементов ГПО (при повторном ТО заполнять паспорт нет необходимости, данные наследуются из первичного ТО, но при необходимости их можно уточнить);

учет экспертных организаций и комиссий, проводивших ТО промышленных объектов;

справочно-нормативная информация (заводы-изготовители, типы ГПО и режимы их работы, стандартные элементы ГПО, типовые дефекты и способы их устранения, нормативные допуски и др.);

результаты нивелировки крановых путей и расчеты их отклонений от допуска в соответствии с методическими указаниями [1, 2];

описание отбракованных элементов ГПО, выявленных дефектов и рекомендаций по их устранению;

архив сведений о проведенных ремонтах и ТО на различных предприятиях за весь срок службы ГПО;

статистика типовых дефектов ГПО по всем промышленным объектам за любой период времени;

формирование отчетной документации (таблицы и графики нивелировки, акты комплексного обследования, дефектные ведомости).

В единой БД учета технического состояния ГПО интегрируются паспортные сведения всех заводов-изготовителей, а предприятия-владельцы при очередном ТО дополнительно предоставляют полную историю ремонтных мероприятий, выполненных в период эксплуатации ГПО. При по-

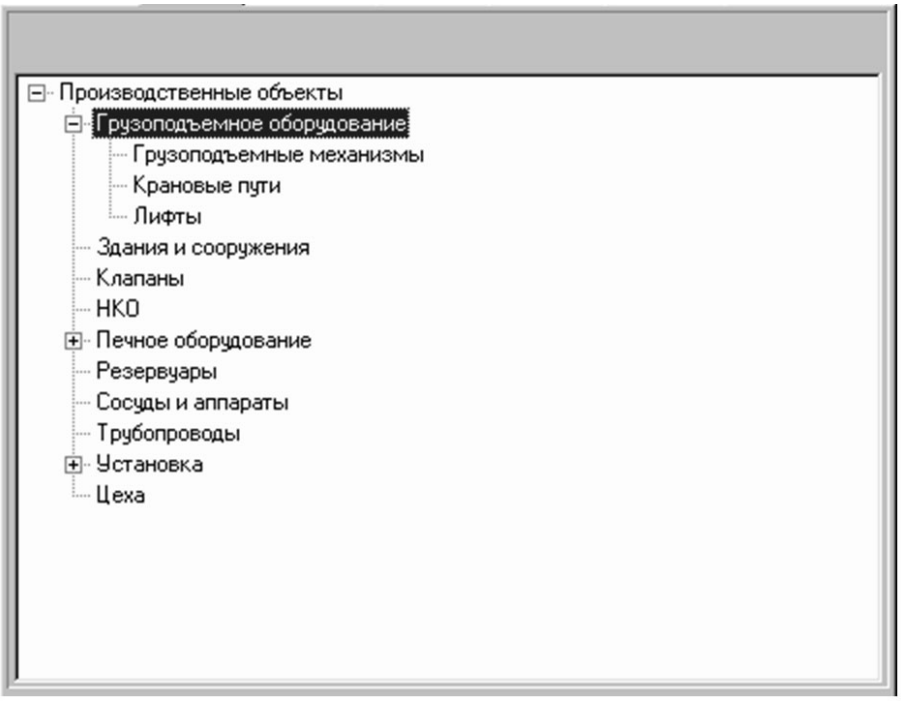


Рис. 3. Иерархия производственного оборудования

вторном ТО паспортные данные наследуются из первичного ТО, но при необходимости их можно обновить. Для этого специалисты экспертной организации должны иметь возможность сопоставить сведения, предоставляемые предприятиями-владельцами ГПО при очередном ТО, с данными интегрированной БД.

Программная реализация ИС учета ТО ГПО

Автоматизированная ИС учета технического состояния ГПО реализована по сетевой технологии «клиент-сервер» в СУБД MS SQL Server объектно-реляционного типа. Клиентские приложения разработаны объектно-ориентированными программными средствами MS Visual C, FoxPro, Visual Basic for Applications (VBA). Программное обеспечение внедрено в экспертной организации по обследованию промышленной безопасности подъемных сооружений ЗАО «Ратте» (Санкт-Петербург) для решения задач комплексного ТО ГПО, эксплуатируемого на предприятиях Северо-Западного региона России и ближнего зарубежья.

Классификация производственного оборудования в интегрированной ИС имеет иерархическую структуру (рис. 3), а каждый вид ГПО определяется своим набором параметров (табл. 1). Интегрированная БД электронных паспортов заполнена информацией, предоставленной предприятиями-владельцами ГПО в период проведения очередного ТО.

Заключение о возможности дальнейшей эксплуатации промышленного объекта базируется на следующих выводах экспертной комиссии:

1) проверка проектно-технической документации на объект, наличия необходимых лицензий, устранения недостатков предыдущего ТО;

2) визуальный (наружный и внутренний) осмотр объекта, на основании которого составляется перечень элементов ГПО, выявленных неисправностях, методах и сроках их устранения;

3) объективные данные замеров отклонения опорных элементов ГПО и фактического положения кранового пути от проектно-нормативных значений, которые фиксируются экспертами при помощи измерительных приборов и также включаются в перечень дефектов.

Результаты замеров фактического положения кранового пути (по высоте, в плане, прямолинейность, ширина колеи, смещение с оси, прогиб, упругая просадка и другие, предусмотренные нормативами [1, 2]) вводятся в БД ГПО экспертом вручную (рис. 4). Дальнейшая обработка выполняется автоматически – рассчитываются отклонения от предельно-допустимых значений в каждой точке замера согласно утвержденным

Таблица 1

Паспортные характеристики объектов ГПО

Наименование параметра	Тип	Ед. измерения	Значение
ID завод-изготовитель	int		1
ID режим работы ГПО	int		6
ID тип ГПО	int		10
Заводской номер	char		0559
Место установки	char		Насосная
Вылет стрелы (пролет)	float	м	12,000
Грузоподъемность	int	кг	5000
Дата изготовления	date		301182
Дата регистрации	date		121282
Цикличность текущих/капремонтов	char		ТТКТТ
Дата капитального ремонта	date		170908
Дата текущего ремонта	date		231010
Дата ТО	date		231011
Периодичность капитальных ремонтов	int	лет	5
Периодичность текущих ремонтов	int	лет	1
Периодичность ТО	int	лет	1
Остаточный ресурс	int	лет	
Примечание	char		

инженерным методикам, результаты нивелировки отображаются в виде сводных таблиц и диаграмм. На рис. 5 в качестве примера приведен график смещения направляющих с оси балки кранового пути, построенный в Excel автоматически по результатам замеров рис. 4. На графике наглядно показано, что значение 50 замера по оси А в точке № 23 превышает предельно-допустимое отклонение 10 мм.

Для каждого типа ГПО и вида замеров созданы шаблоны программными средствами MS Excel и VBA (всего более 50 шаблонов), которые содержат SQL запросы к БД и при открытии сразу заполняются числовыми данными, а по ним автоматически строятся таблицы и графики нивелировки. Эксперт может по своему усмотрению редактировать и печатать сформированный документ Excel, но обратная связь с БД не пред-

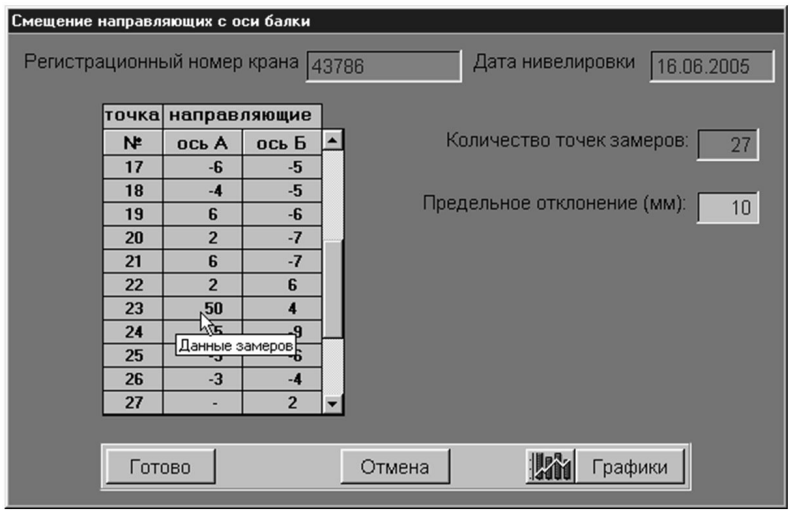


Рис. 4. Результаты замеров отклонений кранового пути

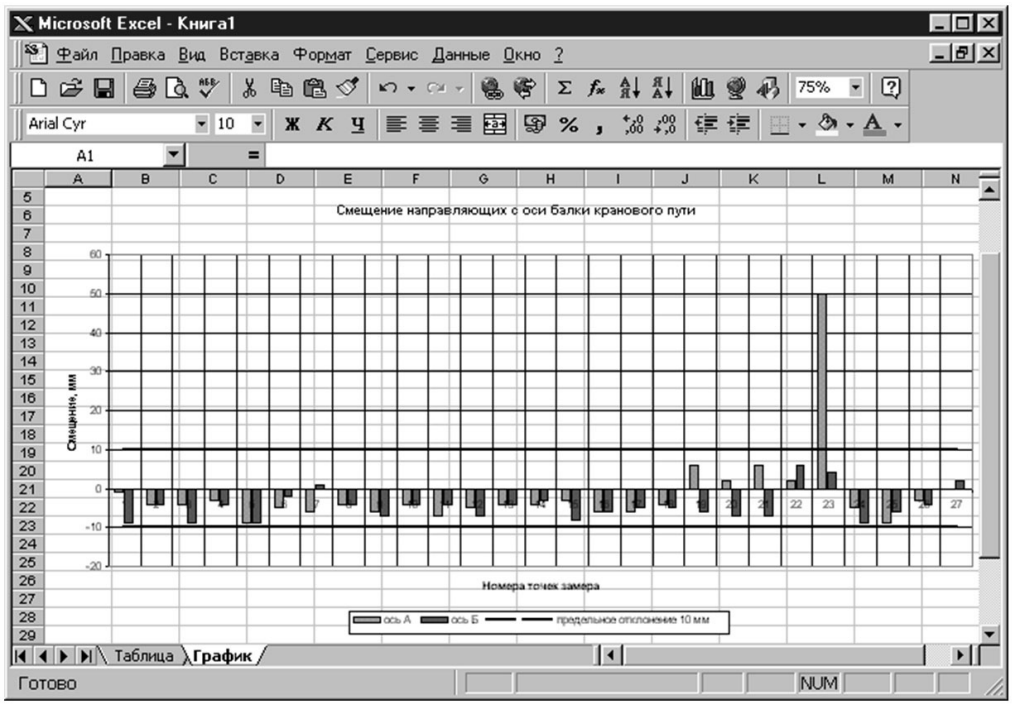


Рис. 5. График нивелировки кранового пути

усмотрена в целях экономии внешней памяти, сохранение возможно только во внешний файл. Вместо этого реализована возможность правки шаблонов Excel и корректировки значений предельных допусков, поскольку действующие нормативы и отчетные формы время от времени пересматриваются контролирующими органами Ростехнадзора.

Любое превышение замеров от предельно-допустимых отклонений обнаруживается информационной системой, и соответствующее описание дефекта автоматически добавляется в перечень элементов ГПО. На экранной форме рис. 6 показан пример описания дефекта на ко-

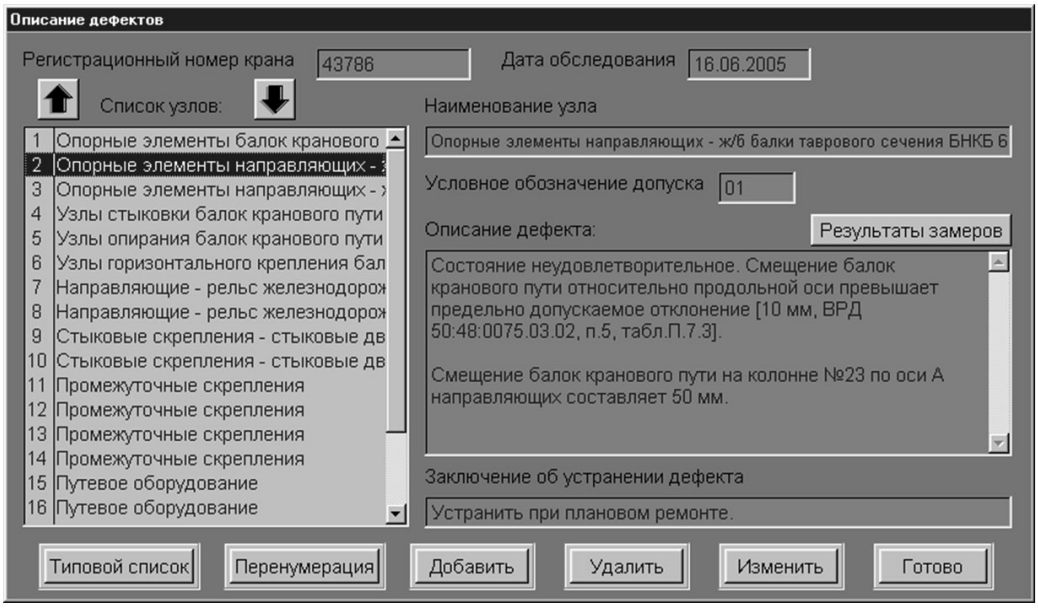


Рис. 6. Перечень элементов ГПО с описаниями выявленных дефектов

Таблица 2

Фрагмент дефектной ведомости на ремонт ГПО

Наименование узла	Описание дефекта	Заключение и сроки устранения
Опорные элементы балок кранового пути (колонны)	Дефектов не обнаружено	
Опорные элементы направляющих (балки кранового пути)	1. Смещение балок кранового пути относительно продольной оси превышает предельно допустимое отклонение 10 мм (ВРД 50:48:0075.03.02, п. 5, табл. П.7.3) и составляет 50 мм на колонне № 23 по оси А	Устранить при плановом ремонте
	2. Нарушено крепление закладных пластин на верхнем поясе балки	Оставить без изменения

лонне № 23, сгенерированного для опорного элемента направляющих – ж/б балки таврового сечения по результатам замеров рис. 4 и 5.

По результатам проведенного ТО оформляется акт комплексного обследования ГПО с ведомостью дефектов. Для автоматизации работы

Таблица 3

Статистика дефектов ГПО

Дата	№ крана	Тип кранового пути	Наименование узла	Описание дефекта
20.09.11	43786	Мостовой	Опорные элементы направляющих – ж/б балки таврового сечения БНКБ 6-3 / БНКБ 6-2	Разрушение свеса верхнего пояса железобетонной подкрановой балки с оголением арматуры на длине 250 мм по оси А направляющих на колонне в точке замеров № 10
20.09.11	87099	Мостовой	Опорные элементы направляющих – ж/б балки таврового сечения БНКБ 6-3 / БНКБ 6-2	Разрушение защитного слоя арматуры верхнего пояса балки кранового пути (с оголением арматуры) на длине 300–400 мм в районе колонны № 16 по оси А направляющих
20.09.11	87101	Мостовой	Опорные элементы направляющих – ж/б балки таврового сечения БНКБ 6-3 / БНКБ 6-2	Разрушение защитного слоя арматуры верхних поясов балок кранового пути (с оголением арматуры): по оси А в районе колонны № 19 (под промежуточным креплением); по оси Б в районе колонн № 17 и 18
20.09.11	87131	Мостовой	Опорные элементы направляющих – ж/б балки таврового сечения БНКБ 6-3 / БНКБ 6-2	Сколы защитного слоя арматуры верхнего пояса балки кранового пути в районе колонны № 16 (с оголением арматуры), расположенной по оси А направляющей

экспертов созданы шаблоны акта программными средствами MS Word и VBA. При создании нового акта обследования эксперт выбирает из списка нужный шаблон, который по SQL запросу к БД автоматически заполняется информацией из паспорта ГПО, перечнем его элементов и выявленных дефектов. Дефектная ведомость хранится внутри шаблона акта и также заполняется автоматически на основе перечня элементов рис. 6. В табл. 2 показан фрагмент дефектной ведомости с перечнем элементов кранового пути, описаниями дефектов и сроками их устранения, в т. ч. дефекта по результатам замеров рис. 4–6.

В отличие от шаблонов Excel, акт обследования с дефектной ведомостью после окончательной доработки экспертом сохраняется в БД как документ Word. Шаблоны Word тоже хранятся в БД и могут изменяться в зависимости от требований нормативов [1, 2].

Таким образом, БД представляет собой архив проведенных ТО, выявленных дефектов и актов комплексного обследования по всем объектам ГПО на различных предприятиях. В информационной системе реализована функция экспорта статистики дефектов за любой период времени во внешний файл Excel, где данные можно группировать и фильтровать по элементам ГПО, типу кранового пути, номеру крана, дате ТО. В табл. 3 приведен перечень выявленных дефектов для опорного элемента (см. рис. 6, табл. 2), эксплуатируемого на разных объектах ГПО. Из табл. 3 следует, что наиболее характерным дефектом этого элемента является разрушение верхнего пояса балки с оголением арматуры.

Внедрение разработанных программных решений в экспертной организации позволило повысить производительность труда экспертов, снизить трудоемкость ТО, сократить сроки подготовки и улучшить качество экспертных заключений. Автоматизированный учет ТО помогает отслеживать техническое состояние объектов ГПО, контролировать выполнение ремонтных мероприятий в случае повторных ТО.

Разработанная ИС автоматизированного учета технического состояния и интегрированная БД ГПО успешно апробированы на практике при проведении экспертизы промышленной безопасности объектов ГПО. В настоящее время в БД интегрированы данные ТО и выявленных дефектов ГПО на 95 промышленных предприятиях Северо-Западного региона России и ближнего зарубежья [4]. Анализ накопленной статистики БД позволил выявить характерные дефекты и наиболее слабые элементы ГПО, их фактический срок службы и запас прочности, дать практические рекомендации эксплуатирующим предприятиям по своевременной профилактике с целью повышения уровня безопасности и снижения затрат на эксплуатацию ГПО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Банных, Г.М.** Комплексное обследование крановых путей грузоподъемных машин: Метод. указания [Текст] / Г.М. Банных, В.В. Зарудный, В.Н. Алексютин [и др.] // Руководящий нормативный документ РД-10-138-97. – М.: Изд-во «Истек», 2004. –20 с.

2. **Галетин, В.М.** Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы [Текст] / В.М. Галетин, С.П. Голев, В.Г. Жуков [и др.] // Руководящий нормативный документ РД-10-112-3-97. –М.: Изд-во «Истек», 1997. –38 с.

3. **Котельников, В.С.** Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов ПБ 10-382-00 [Текст] / В.С. Котельников, Н.А. Шишков, А.С. Липатов [и др.]. –СПб.: ЦОТПБСП, 2000. –129 с.

4. **Мещеряков, С.В.** Анализ эксплуатационных дефектов грузоподъемного оборудования в системе автоматизированного проектирования [Текст] / С.В. Мещеряков, В.М. Иванов, Д.Е. Бортяков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 6–2 (138).

5. **Мещеряков, С.В.** Эффективные технологии создания информационных систем [Текст] / С.В. Мещеряков, В.М. Иванов. –СПб.: Политехника, 2005. –312 с.

6. **Mescheryakov, S.** Performance Comparison of Various Hierarchical Structures in Database Systems [Text] / S. Mescheryakov // Proc. of the 30th International Conf. for the Resource Management and Performance Evaluation of Enterprise Computing Systems. –Las Vegas, USA, 2004. –10 p.

УДК 004.428.4

Н.В. Захаревич, Д.И. Иванов, И.А. Цикин

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГАЗОФАЗНОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР ПРИ СЕТЕВОМ ДОСТУПЕ К КЛАСТЕРНОМУ ВЫЧИСЛИТЕЛЮ

Современные тенденции развития технологий высокопроизводительных вычислений и средств удаленного доступа к средам моделирования позволяют реализовывать эффективные сервисы доступа для проведения виртуальных экспериментов, что особенно актуально при реализации проектов различного рода симуляторов реальной аппаратуры [1–3].

Один из примеров применения подобных методов – область исследований, связанных с изучением процессов газофазного синтеза наноструктур и наноматериалов [4]. Такие задачи требуют как наличия высокопроизводительной системы, так и качественной визуализации полученных в результате моделирования данных. При этом актуальными становятся направления, связанные с разработкой методологии представления результатов, дающих полномасштабную информацию и об интегральных характеристиках описываемых процессов, и о детальном представлении при их визуализации (поля скоростей, давлений, концентраций реагентов и т. д.) как в локальных областях течения, так и во всем объеме нанореакторов.

При разработке моделей газофазного синтеза на макроуровне и на уровне химических процессов можно выделить программный пакет FLUENT, позволяющий моделировать, в т. ч. и газодинамические процессы, протекающие в реакторах. Технологии удаленного доступа при этом должны как предоставлять достаточное интерфейсное окружение для управления такими симуляторами, так и обладать возможностью визуализации результатов, сохраненных при помощи специализированных стандартов, поддерживаемых пакетом FLUENT. Для этого необходимо разработать средства визуализации, отвечающие следующим требованиям:

модуль визуализации должен интегрироваться в систему удаленного доступа, реализованную как web-приложение [3];

интерактивность производимых визуализаций должна обеспечиваться без дополнительного сетевого обращения к кластерному вычислителю;

разрабатываемые средства должны работать на максимально широком классе клиентских компьютеров;

необходимо предоставить пользователю различные способы отображения – графики, цветовые схемы, трехмерные модели;

необходимо обеспечить качество визуализации, сравнимое с результатами, получаемыми при использовании средств визуализации, интегрированных в среды моделирования, такие, как FLUENT.

Подобным требованиям наилучшим образом отвечает создание модуля визуализации по технологии RIA (Rich Internet Application). В рамках данной технологии в настоящее время существует различное число средств для создания сетевых приложений. Одни из них основаны на установке в web-браузер пользователя дополнительного программного обеспечения (плагины, ActiveX компоненты), другие используют только средства браузера. Примерами первого типа технологии являются Java-апплеты, Adobe Flash, Microsoft Silverlight, Adobe Shockwave; второго типа – приложения, написанные на языке JavaScript с использованием технологии AJAX и средств HTML5. Поскольку существует задача обеспечения пользователю разнообразных способов предоставления информации, включая трехмерные представления данных, необходимо выбрать приложение с максимально широким спектром возможностей для демонстрации визуальной информации. С учетом сказанного предпочтение следует отдать вариантам первого типа.

Среди имеющихся дополнительных модулей к web-браузерам, которые можно использовать для создания двухмерных и трехмерных визуализаций, Adobe Flash обладает следующими преимуществами:

согласно данным корпорации Adobe, распространение Flash плеера на пользовательских компьютерах составляет более 99 %;

Adobe Flash широко используется для создания web-приложений, соответственно разработаны и апробированы стандартные методы;

для Adobe Flash существует значительное количество библиотек по работе с трехмерной графикой.

Другие дополнительные модули, такие, как Microsoft Silverlight, Adobe Shockwave, Java-апплеты либо значительно менее распространены на компьютерах пользователей, либо не обладают достаточным количеством средств для отображения трехмерной графики. Таким образом, использование Adobe Flash для разработки средств визуализации результатов моделирования в системе удаленного доступа к кластерному вычислителю представляется наиболее перспективным.

Рассмотрим подробнее средства Flash. которые необходимо использовать для решения поставленной задачи. В настоящее время при разработке Flash приложений используется язык программирования ActionScript версии 3. В данной версии языка создание растровых изображение осуществляется средствами Flash без применения сторонних расширений. Для работы с растровыми изображениями применяются классы BitmapData и Bitmap.

Для работы с трехмерной графикой на Flash необходимо использование специализированных дополнений. Существуют различные библиотеки для работы с трехмерными объектами, среди которых можно выделить следующие:

PaperVision;

Away3D;

Sandy 3D Engine;

Alternativa Platform;

Yougurt3D

и др.

Наиболее вероятным кандидатом на использование в условиях обозначенной специфики доступа является библиотека Away3D [5], обладающая широкой функциональностью и простотой в использовании. Библиотеки Yougurt3D и Sandy 3D Engine не обладают такими необходимыми функциями, как исправление сортировки и программное управление текстурным материалом. Система Alternativa Platform более ориентирована на создание игровых приложений, а не научных визуализаций. Функционал библиотеки PaperVision фактически идентичен функционалу Away3D, так что целесообразно рассматривать вариант использования этой библиотеки. Также можно отметить, что использование системы классов в библиотеке Away3D проще, чем в PaperVision.

Применяемая для расчетов на кластерном вычислителе система FLUENT может сохранять результаты моделирования в различных форматах: как растровых изображений (например, формат JPG), так и различных бинарных и текстовых форматах данных. При построении системы удаленного доступа возникает задача передачи этих данных в клиентское программное обеспечение пользователя, а также задача визуализации информации, содержащейся в обозначенных бинарных и текстовых форматах. При этом информация в таких форматах сохраняется в более детализированом виде, чем в растровых форматах, что открывает широкие возможности для изучения результатов моделирования при помощи специализированных визуализаторов. При этом целесообразно выбрать один из поддерживаемых FLUENT текстовых или бинарных форматов данных.

В качестве формата данных для представления результатов можно рассмотреть два варианта: формат программы Gnuplot [6] или формат программы TecPlot [7]. Более перспективным решением представляется ASCII формат TecPlot, который для уменьшения количества информации, передаваемой через сеть, эффективно компрессируется программой gzip и, кроме того, сравнительно легко реализуется в пакете FLUENT. Этот формат является стандартным решением для экспорта и обработки результатов моделирования, следовательно, разрабатываемое решение инвариантно к программному обеспечению кластерного вычислителя.

Для решения задачи визуализации результатов работы кластерного вычислителя требуется запросить от web-приложения список данных, требующих визуализации, получить эти данные с сервера, перевести их в формат, с которым может работать Flash, и, наконец, вывести полученные изображения на экран. Рассмотрим функциональную схему модуля визуализации (рис. 1).

Последовательность действий по визуализации начинается с загрузки Flash модуля, встроенного в web-приложение, осуществляющее доступ к кластерному вычислителю. После загрузки производится запрос списка файлов данных. Особенности реализации такого запроса для случая интеграции Flash модуля будут рассмотрены ниже.

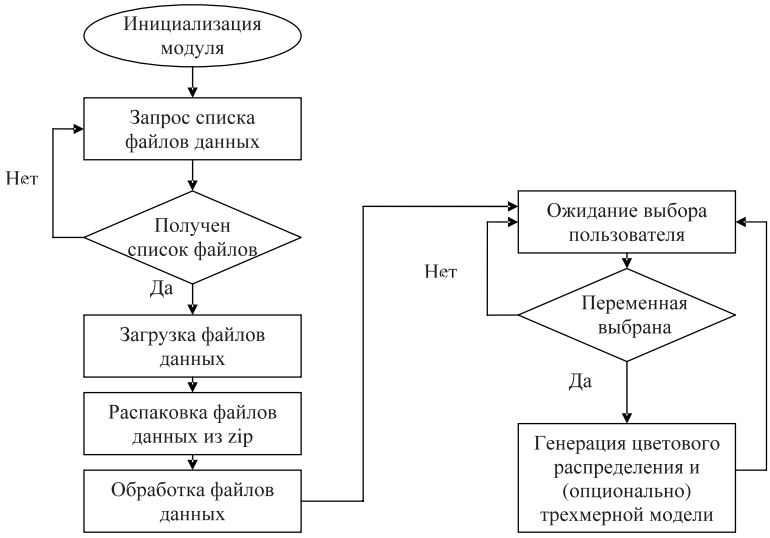


Рис. 1. Блок-схема обработки данных для визуализации

Загрузка файлов с сервера во Flash оформлена в отдельный, асинхронный с общей программой поток, что позволяет осуществлять предварительную обработку полученных данных в процессе получения следующего блока, а также визуализировать процесс загрузки. После загрузки при необходимости производится разархивирование файлов. Полученные текстовые файлы в формате TecPlot обрабатываются: находящиеся в них данные разбираются и записываются в специализированные массивы. В используемом для разработки Flash приложений языке ActionScript имеются различные средства для работы с массивами данных. Наиболее сложным в использовании, но максимально эффективным по скорости доступа к элементу и отводимой на массив области памяти является класс ByteArray. В силу большого размера загружаемых данных уменьшение времени доступа к отдельному блоку данных значительно увеличивает производительность системы, поэтому принято решение основывать реализацию именно на этом классе. Поскольку обработка данных производится в основном потоке вычислений (thread) виртуальной машины Flash, то чтение из загруженного файла и заполнение массивов производится порционно, чтобы избежать ограничений на длительность выполнения Flash программы.

Полученные массивы данных используются для формирования двумерных изображений распределения значений выбранных пользователем переменных на заданной поверхности. Распределение показывается с помощью цветовой шкалы. В отличие от формирования подобных изображений на сервере и загрузке их на компьютер клиента как растровых изображений, формирование на клиентском компьютере позволяет:

создавать изображения для части поверхности;

изменять интервал цветовой шкалы для уточнения распределения в заданных интервалах.

Для общего представления пользователя о течении процессов в реакторе целесообразно воспользоваться технологией трехмерной визуализации и продемонстрировать, как соотносятся полученные данные (например, распределение температур, давления или концентрации какого-либо газа) с формой и размером реактора.

Таким образом, возникает задача создания специализированного интерфейса визуализации как самого процесса конфигурирования параметров реактора, так и визуализации собственно результатов, представленных в масштабах реактора. В качестве пилотного варианта разработан модуль визуализации, учитывающий данные особенности, при этом использована обозначенная ранее библиотека Away3D.

Разработка Flash модуля велась с использованием языка программирования ActionScript версии 3, т. к., в отличие от второй версии этого языка, в третьей версии появилась возможность работать с бинарными файлами, а также была оптимизирована работа интерпретатора в целом, что позволило обрабатывать значительные объемы данных. Поскольку предполагается, что данные для визуализации будут загружаться с сервера,

то для загрузки внешних файлов в ActionScript 3 можно использовать класс URLLoader. Данный класс позволяет асинхронно загружать как текстовые, так и бинарные файлы. Поскольку процесс моделирования методом конечных элементов включает в себя расчет данных в значительном (до десятков тысяч) количестве узлов, то результатом моделирования могут являться файлы значительного размера (средний размер файла в текстовом несжатом формате – 10–15 Мб), так что возникает задача уменьшения размера закачиваемых по сети файлов.

Данная задача может быть решена следующими способами: использование бинарного формата TecPlot, пост-обработка ASCII формата TecPlot на сервере с целью уменьшения избыточности данных либо архивирование ASCII формата TecPlot на сервере. Поскольку последний вариант наиболее прост в реализации, а выигрыш по объему файла при сравнении бинарного формата TecPlot и архивированного ASCII формата незначителен, целесообразно использовать в качестве формата данных текстовый формат пакета TecPlot с архивированием полученных в результате расчета на кластере данных. Структура данных допускает значительную компрессию при использовании стандартного алгоритма DEFLATE [8]. Средний уровень компрессии файлов составляет около 80 %. Таким образом, удается сократить время загрузки файлов данных, а также минимизировать возможные проблемы обрыва связи в процессе загрузки. Загружаемые файлы являются бинарными, и необходимо установить свойство dataFormat класса URLLoader равным URLLoaderDataFormat.BINARY. Flash модуль последовательно загружает файлы из полученного из web-страницы списка с выводом на экран индикации процесса загрузки.

Загруженные с сервера данные необходимо перед обработкой предварительно разархивировать. В ActionScript 3.0 имеется возможность работы с алгоритмом DEFLATE, используя класс ByteArray. Однако при этом на усмотрение разработчика остается обработка правильного заголовка файла и метаданных. Для этого можно воспользоваться классом GzipEncoder [9]. В случае если размер файлов данных невелик (несколько килобайт), то они могут передаваться в неархи-

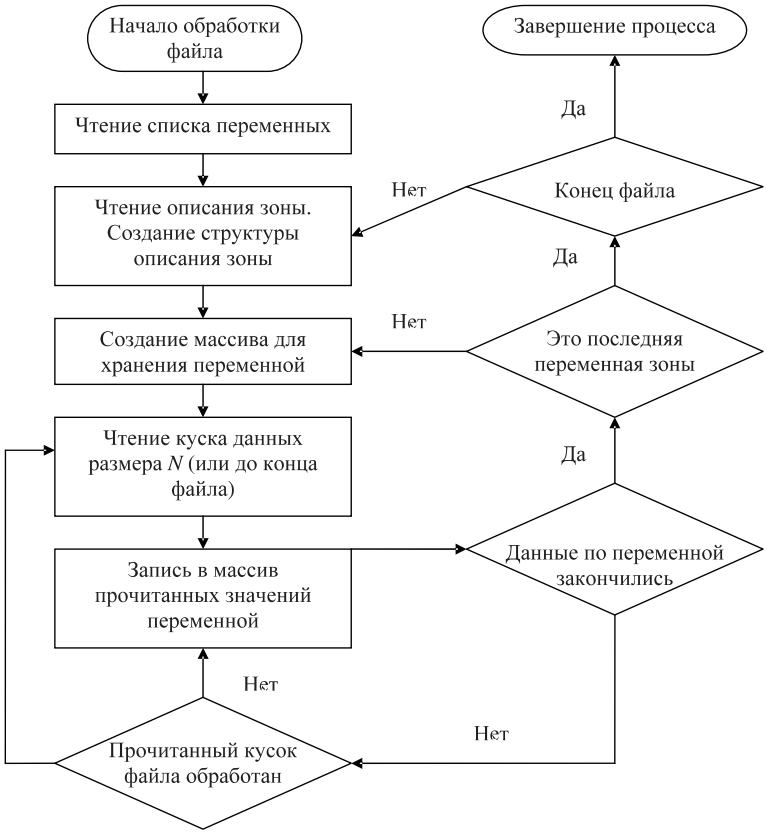


Рис. 2. Блок-схема обработки загруженных данных

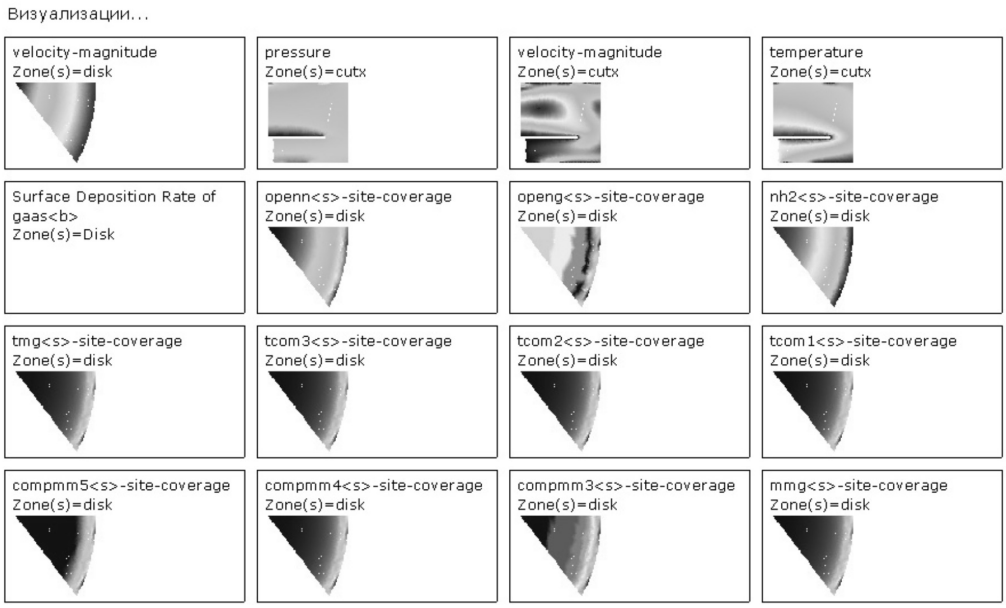


Рис. 3. Экран выбора переменной для визуализации

вированном виде. Система различает тип загруженного файла, т. е. является ли загруженный файл архивом или нет, и обрабатывает его соответственно.

После разархивирования производится *обработка данных*. Текстовое представление данных в формате TecPlot преобразуется в массивы данных, оптимизированные для работы виртуальной машины Flash. Поскольку, в отличие от загрузки файлов, дальнейшая обработка производится в основном потоке вычислений Flash, то возникает задача реализации системы частичной обработки файла, иначе процесс обработки будет ограничен по времени выполнения тайм-аутом выполнения скрипта.

Все вычисления во Flash производятся как обработка некоторого события. При этом время вычисления ограничено. Таким образом достигается реакция на действия пользователя при работе виртуальной машины Flash в одном процессе (thread). Одним из таких событий является ENTER_FRAME – обработчик начала формирования кадра анимации. Частота вызова этого обработчика задается в свойствах Flash приложения и обычно составляет 12 или 25 кадров в секунду. Соответственно расчеты, выполняемые в этом обработчике, не должны превышать по времени выполнения 40 мс (при 25 кадрах в секунду). Таким образом, необходима подпрограмма, последовательно читающая из распакованного файла данные и записывающая их в массивы. При этом при первом вызове подпрограммы оценивался бы размер фрагмента файла, который она может прочитать и обработать за один цикл работы.

Также в процессе заполнения массивов для каждой из находящихся в файле переменных может быть вычислено минимальное и максимальное значение отдельно в каждой зоне. На рис. 2 приведена блок-схема работы такой подпрограммы.

Таким образом, можно реализовать чтение ASCII формата TecPlot и преобразование его в структуры данных Flash, а также устранить ограничение на размер обрабатываемого файла.

Формирование изображений. После окончания обработки загруженных файлов Flash модуль переходит в режим ожидания действий пользователя, которому показывается список переменных, данные по которым находятся в загруженных файлах. Для наглядности помимо имен переменных выводятся небольшие изображения визуализаций цветовых диаграмм соответствующих распределений (рис. 3).

После выбора пользователем переменной, которую предстоит визуализировать, Flash модуль действует в зависимости от типа загруженных данных. Если данные представляют собой зависимость $y = f(x)$, то рисуется график этой зависимости (рис. 4).

В случае распределения значений переменной по поверхности, заданной набором узлов, модуль

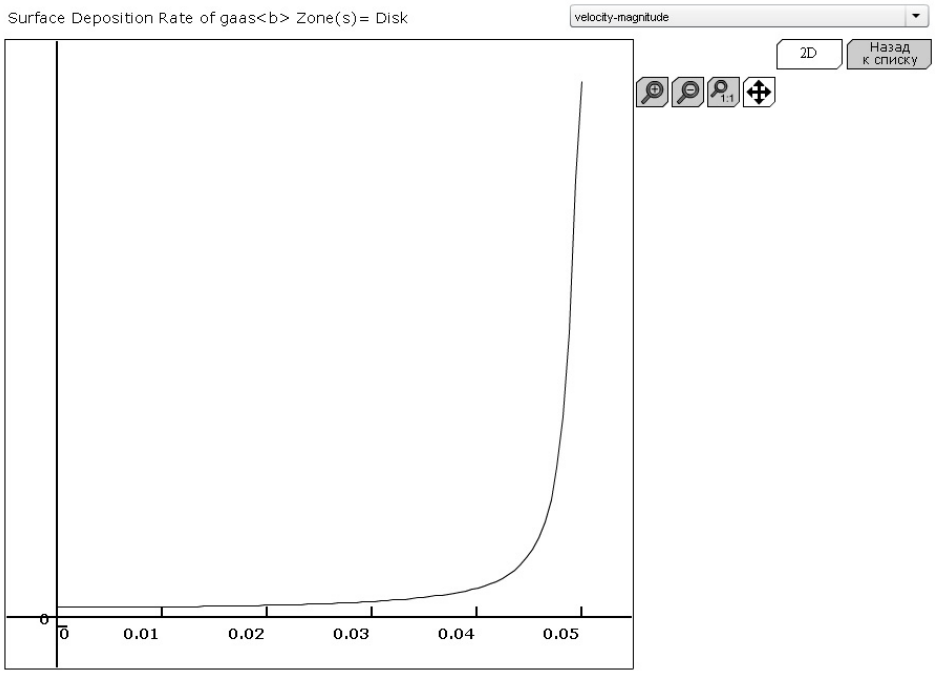


Рис. 4. График распределения скорости осаждения gaas<b>

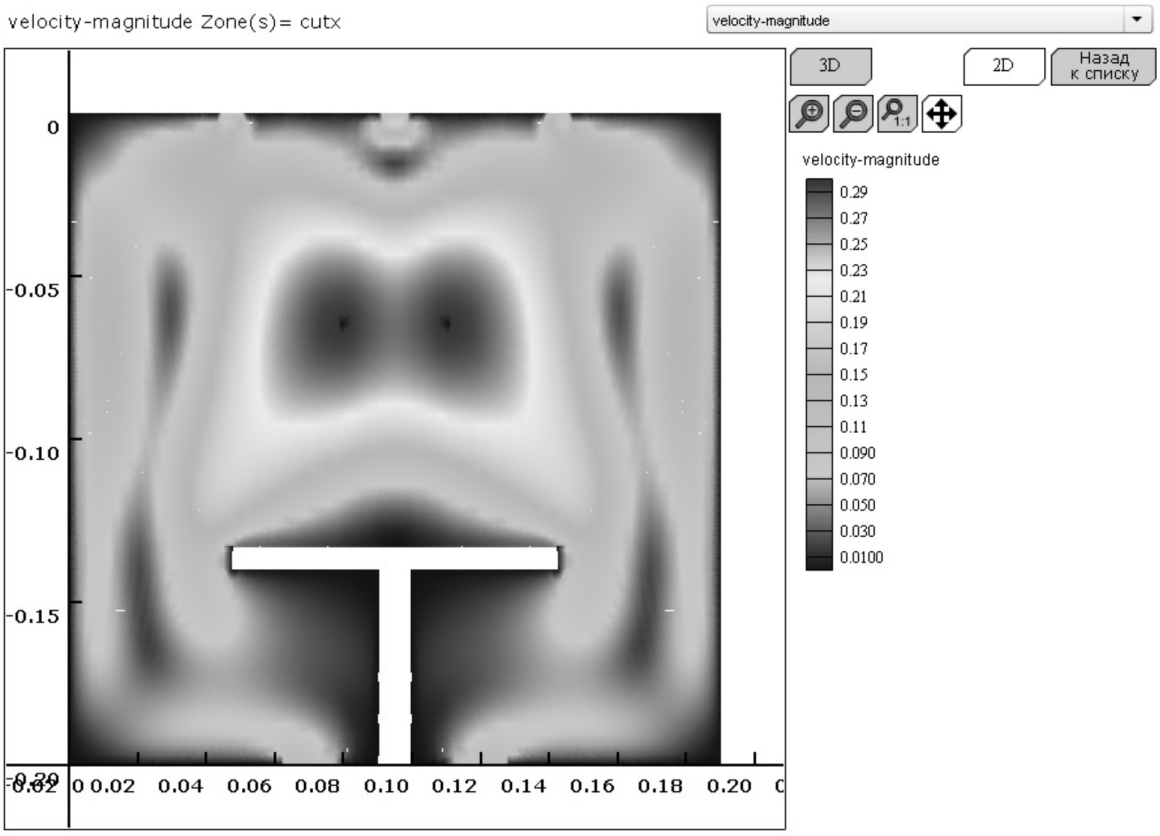


Рис. 5. Экран с контейнером для перемещения и масштабирования двумерного изображения

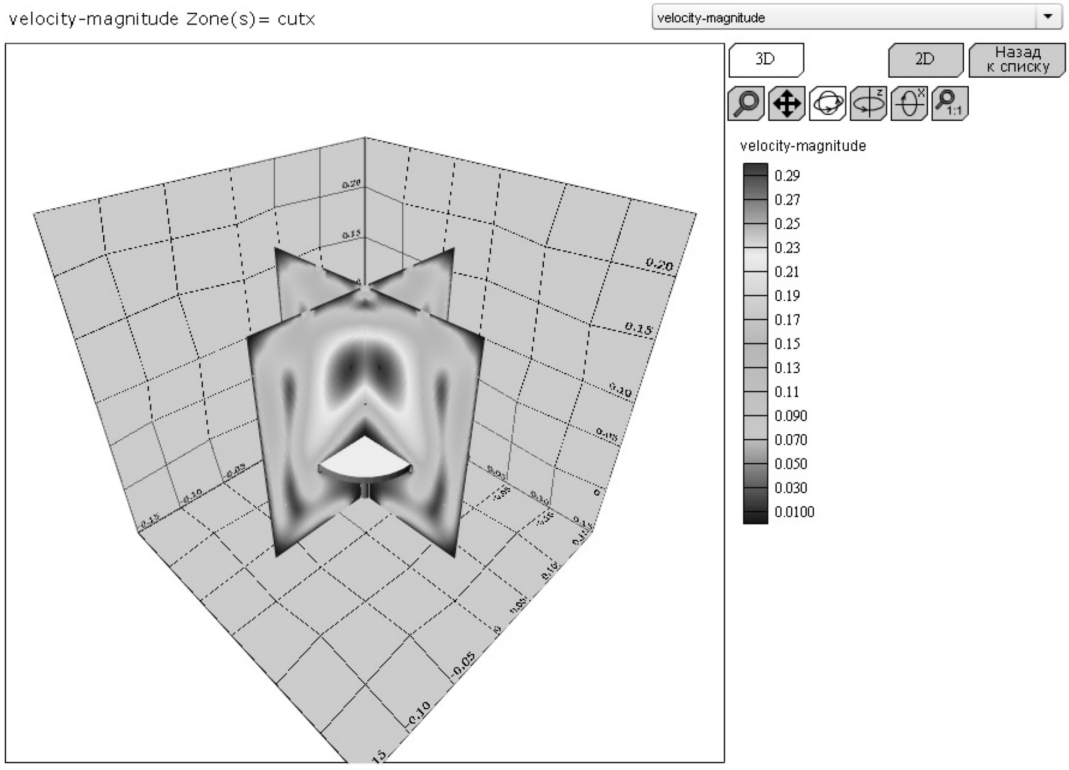


Рис. 6. Экран с контейнером для перемещения и масштабирования двумерного изображения

создает растровое изображение, которое окрашивается соответственно имеющимся данным. Раскраска производится следующим образом:

из всех узлов данной зоны выбираются те, которые попадают в визуализируемый интервал (исходно это все узлы);

рассчитываются координаты этих узлов в пикселях на растровом изображении;

для каждого элемента в списке связей (состоящем из четырех узлов, т. к. выбран тип Quadrilateral) создаются два треугольника, для каждого из которых выполняется интерполяция цветов между цветами узлов.

Созданное растровое изображение помещается в контейнер, позволяющий пользователю интерактивно перемещать и масштабировать помещенную в него растровую картинку. Пример помещенного в контейнер изображения показан на рис. 5.

Пользователю предоставляются следующие инструменты:

увеличение масштаба в два раза вокруг места клика мыши;

уменьшение масштаба в два раза вокруг места клика мыши;

перемещение растровой картинки с помощью мыши;

кнопка возвращения к исходному положению и масштабу.

Помимо интерактивного двумерного изображения Flash модуль включает интерактивную трехмерную визуализацию, демонстрирующую двумерные визуализации различных параметров внутри модели реактора. Модель состоит из двух перпендикулярных плоскостей, на которые наложены растровые изображения значений выбранной переменной, а также схематического изображения подложки реактора.

Для наглядности к модели добавлены плоскости с координатными сетками и размерами моделируемого реактора (рис. 6). Для данной трехмерной визуализации разработана универсальная система навигации, включающая:

вращение с помощью мыши вокруг осей X и Z;

вращение с помощью мыши вокруг осей X и Z по отдельности;

перемещение модели;

масштабирование модели;

возврат положения и масштаба модели к исходному состоянию.

Таким образом, рассмотренный в настоящей статье инструментарий позволяет осуществлять визуализацию TecPlot файлов, являющихся результатами моделирования процессов внутри реактора, при этом данный инструментарий может быть легко интегрирован в общий web-интерфейс системы удаленного доступа к кластерному вычислителю.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в РФ на 2008–2011 гг.», госконтракт № 16.647.12.2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов, Д.И.** Сетевая реализация стохастических моделей радиотехнических устройств [Текст] / Д.И. Иванов, И.А. Цикин // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. –2006. –№ 3. –С. 34–41.

2. **Иванов, Д.И.** Удаленный сетевой доступ к специализированной среде моделирования [Текст] / Д.И. Иванов, И.А. Цикин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2007. –№ 4. –Т. 2. –С. 7–12.

783. **Иванов, Д.И.** Реализация режима удаленного программирования в специализированной среде моделирования MATLAB [Текст] / Д.И. Иванов, И.А. Цикин // Информационные технологии. –2008. –№ 11. –С. 23–27.

4. **Болдырев, Ю.Я.** Высокопроизводительные вычисления в задачах газофазного синтеза получения наноматериалов [Текст] / Ю.Я. Болдырев, К.Ю. Замотин, Е.П. Петухов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2011. –№ 6.2.

5. Away3D [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://away3d.com/ (дата обращения 05.09.2011)

6. Gnuplot [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.gnuplot.info/ (дата обращения 05.09.2011)

7. Tecplot [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.tecplot.com/ (дата обращения 05.09.2011)

8. DEFLATE Compressed Data Format Specification version 1.3 [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://tools.ietf.org/html/rfc1951/ (дата обращения 05.09.2011)

9. Action script GZIP compression library [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://probertson.com/projects/gzipencoder/ (дата обращения 05.09.2011)

УДК 681.3.016

С.В. Мещеряков, В.М. Иванов, Д.Е. Бортяков

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Технический контроль состояния грузоподъемного оборудования (ГПО) осуществляется как внутренними органами технадзора на предприятии, так и внешними экспертными организациями в соответствии с Правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов [5], установленными Ростехнадзором, и рядом других руководящих документов [1–4]. Объектами комплексного обследования являются не только грузоподъемные краны, но и опорные и стыковые конструкции, крановые пути, электроподвод и прочее оборудование.

Периодичность технического освидетельствования (ТО) зависит от грузоподъемности, режима работы крана (легкий, средний, тяжелый), срока его службы и интенсивности нагружения (табл. 1). Первичное ТО проводится через три года, повторные зависят от фактического срока и интенсивности эксплуатации. В дальнейшем решение о списании крана или продлении срока его эксплуатации принимается на основании расчета остаточного ресурса несущих металлоконструкций.

Любое ТО как внутреннее, так и внешнее, связано с затратами на его проведение, которые оплачиваются предприятием-владельцем, поэтому оно напрямую заинтересовано в устранении всех выявленных дефектов в указанные сроки, максимальном увеличении периодичности ТО и продлении срока службы ГПО.

В случае внешнего ТО экспертная организация получает от заказчика техническое задание, проектно-конструкторскую и эксплуатационную документацию на ГПО, а группа экспертов на основании внешнего осмотра и сделанных поэлементных замеров оценивает текущее состояние

Таблица 1

Периодичность ТО ГПО грузоподъемностью до 10 т при работе 1,5 смены и цикличности ремонтов ТТКТТ (два текущих, капитальный, два текущих)

Режим работы крана согласно Правилам [5]	Максимальный срок эксплуатации ГПО после очередного ТО, лет [4]					Нормативный срок службы ГПО, лет [4]
	Первичного	Повторных				
		1-го	2-го	3-го	4-го	
Легкий, средний	3	2	2,5	2	1,5	10–16
Тяжелый	2	2,5	2	1,5	–	8–10

промышленного объекта и подтверждает свои выводы актом комплексного обследования с дефектной ведомостью. Основная трудность заключается не в том, что предприятие-владелец противится изменениям, а в том, что экспертам не удается прогнозировать последствия предлагаемых мероприятий ввиду отсутствия базы знаний и точной методики расчета.

В данной статье описана структура базы данных (БД) обследований ГПО, успешно реализованная на практике и эксплуатируемая в течение многих лет. Накопленные данные ТО могут использоваться экспертами для более точного прогнозирования остаточного срока службы, а также в системах автоматизированного проектирования при разработке новых моделей ГПО и режимов их работы.

Структура базы данных дефектов ГПО

При проектировании БД использованы методы структурного анализа, предложенные в работе [6], основой которых является декомпозиция системы на составляющие и их иерархическая организация. На рис. 1 показана иерархия мероприятий ТО ГПО, проводимых на предприятиях, а на рис. 2 – диаграмма состояний и потоков данных в этой системе.

Представление данных ТО ГПО в информационной системе реляционного типа показано на рис. 3 *а*. При первом анализе становится очевидным, что данная реляционная модель является избыточной и может быть оптимизирована. Так, сущности «Акты расследования неполадок», «Акты обследования», «Акты технического состояния после ремонта», «Дефектная ведомость

Рис. 1. Иерархия мероприятий по техническому обслуживанию ГПО

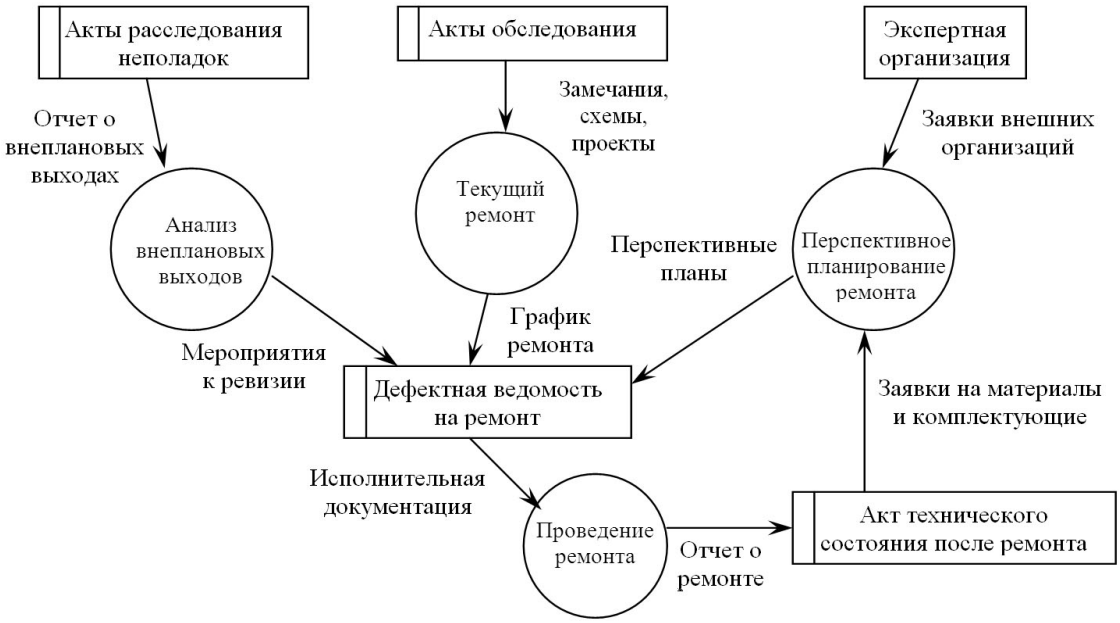


Рис. 2. Структура потоков данных в системе ТО ГПО

на ремонт» имеют ряд общих атрибутов (номер, дата, объект ремонта, исполнитель, мероприятия и др.). Поэтому их можно объединить в одно реляционное отношение «Ремонтные мероприятия – объект ремонта».

Если ввести новый признак «Вид ремонта» (текущий, капитальный, проведенный, перспективный, внеплановый), то соответствующие понятия становятся равнозначными в рамках формализованной сущности «Ремонтные мероприятия». Кроме того, новый атрибут служит одновременно видом ремонта и статусом его выполнения (проведен, выполняется или предстоит). Изменение перечисленных статусов (переход из одного состояния в другое) может быть вызвано одним из следующих событий в системе:

обследование объекта – событие, происходящее перед очередным плановым ремонтом, в процессе которого ремонтные мероприятия разделяются на текущие и перспективные;

текущий ремонт – событие, происходящее в плановый период, в результате которого статус ремонтных мероприятий меняется на «проведенные»;

плановый срок истек – это событие возникает только для перспективных мероприятий, когда они не выполняются в намеченный срок и их статус меняется на «просроченные», что увеличивает вероятность внеплановых (аварийных) выходов из строя.

Другие события, такие, как изменение структуры текущих/капремонтов ТТКТТ на другую цикличность, увеличение/уменьшение периодичности ТО, не влияют на изменение состояний в моделируемой системе. Перечисленные события могут происходить во времени двумя путями:

плановый срок – события наступают регулярно в соответствии с заданной периодичностью;

внеплановый срок – события происходят эпизодически с определенной вероятностью.

После декомпозиции и оптимизации реляционная модель дефектов ГПО имеет вид как на рис. 3 *б*.

Дефектная ведомость на ремонт может быть получена путем реляционной операции выборки кортежей для заданного «Объекта ремонта» при одинаковом значении «Даты» с последующей реляционной операцией проецирования результата выборки на необходимые атрибуты «Ремонтных мероприятий», как показано ниже:

R_1 = «Акты расследования неполадок» («Номер», «Дата», «Причина», «Признак остановки»);

R_2 = «Акты обследования» («Номер», «Дата», «Вид ремонта», «Текущие мероприятия»);

R_3 = «Акты технического состояния после ремонта» («Номер», «Дата», «Исполнитель», «Проведенные мероприятия», «Перспективные мероприятия»);

D = «Дефектная ведомость на ремонт» («Номер», «Дата», «Название», «Объект ремонта»).

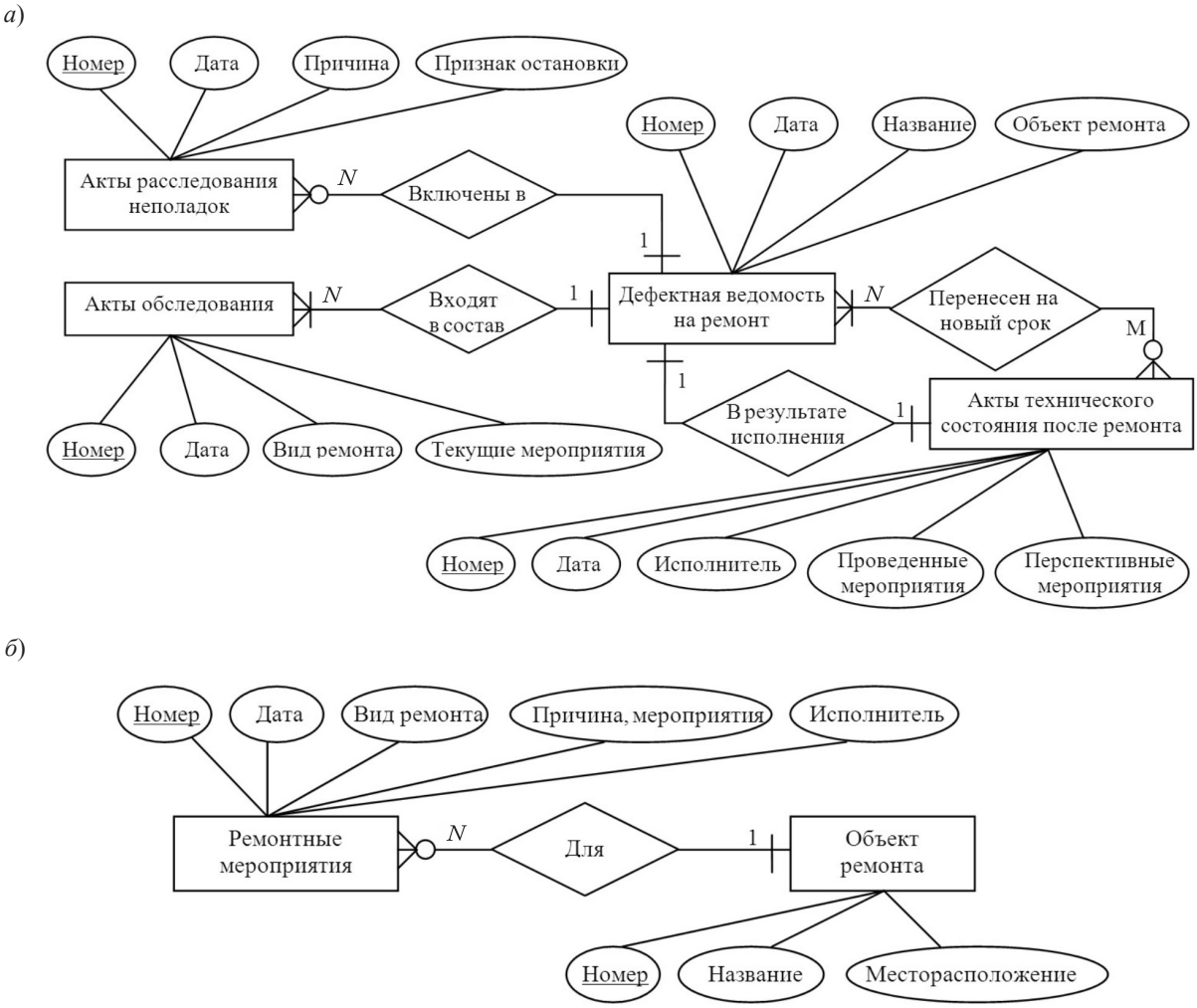


Рис. 3. Представление данных ТО ГПО в реляционной системе:
а – первоначальная реляционная модель ТО ГПО; *б* – реляционная модель дефектов ГПО после декомпозиции

После реляционной операции соединения

$$A = R_1 \cup R_2 \cup R_3 = \{a\colon a \in R_1 \vee a \in R_2 \vee a \in R_3\} \quad (1)$$

имеем новые отношения

O = «Объект ремонта» («Номер», «Название», «Месторасположение»);

A = «Ремонтные мероприятия» («Номер», «Дата», «Вид ремонта», «Причина, мероприятия», «Исполнитель»)

с набором атрибутов a_1 = «Номер»; a_2 = «Дата»; a_3 = «Вид ремонта»; …

Реляционная операция выборки подмножества кортежей, удовлетворяющих условиям a_2 = = «Дата»; O = «Объект ремонта»

будет иметь вид:

$$S = D\,[A\ \theta\ O, A\ \theta\ a_2] = \\ = \{d\colon d \in D \wedge (d[A]\ \theta\ O) \wedge (d[A]\ \theta\ a_2)\}. \quad (2)$$

В итоге реляционной операции проецирования результата выборки S на атрибуты $a_1, a_2, a_3, \ldots$ получим:

$$P = S\,[a_1, a_2, a_3, \ldots] = \{s[a_1, a_2, a_3, \ldots]\colon s \in S\}. \quad (3)$$

Основываясь на выражениях (1)–(3), запрос на языке реляционного исчисления будет сформулирован следующим образом:

Выбрать «Объект, вид ремонта, причину, мероприятия, исполнителя» из «Ремонтных мероприятий» такие, что существует «Объект ремонта» для заданной «Даты».

Заметим, что реляционная операция взятия проекции P не приведет к возникновению кортежей-дубликатов в вертикальном срезе данных, поскольку тип и кардинальность связи «Ремонтные мероприятия – объект ремонта» (многие к одному, обязательная на стороне сущности

«Объект ремонта») не допускает создания одинаковых кортежей с набором атрибутов «Объект ремонта, вид ремонта, причина, мероприятия, исполнитель».

Разработанная структура данных (рис. 3 *б*) проверена на практике [7] и может быть реализована в любой СУБД объектно-реляционного типа.

Анализ накопленной статистики дефектов ГПО

Разработанная БД дефектов ГПО является ядром информационной системы, внедренной в экспертной организации ЗАО «Ратте» (Санкт-Петербург) для комплексного обследования ГПО и крановых путей. За период 2000–2011 гг. экспертами было проведено 1883 обследования 180 промышленных объектов на 95 предприятиях Северо-Западного региона России и ближнего зарубежья (рис. 4 *а*), в результате которых было выявлено 11366 дефектов, из них 1707 (15 %) неисправностей требовали немедленного устранения. Многолетний опыт обследований ГПО позволяет разделить обнаруженные дефекты по способам устранения на несколько групп (рис. 4 *б*):

1) неисправности, требующие немедленного устранения;

2) дефекты, которые можно устранить в срок до очередного ТО;

3) некритичные замечания, при которых эксплуатация разрешается.

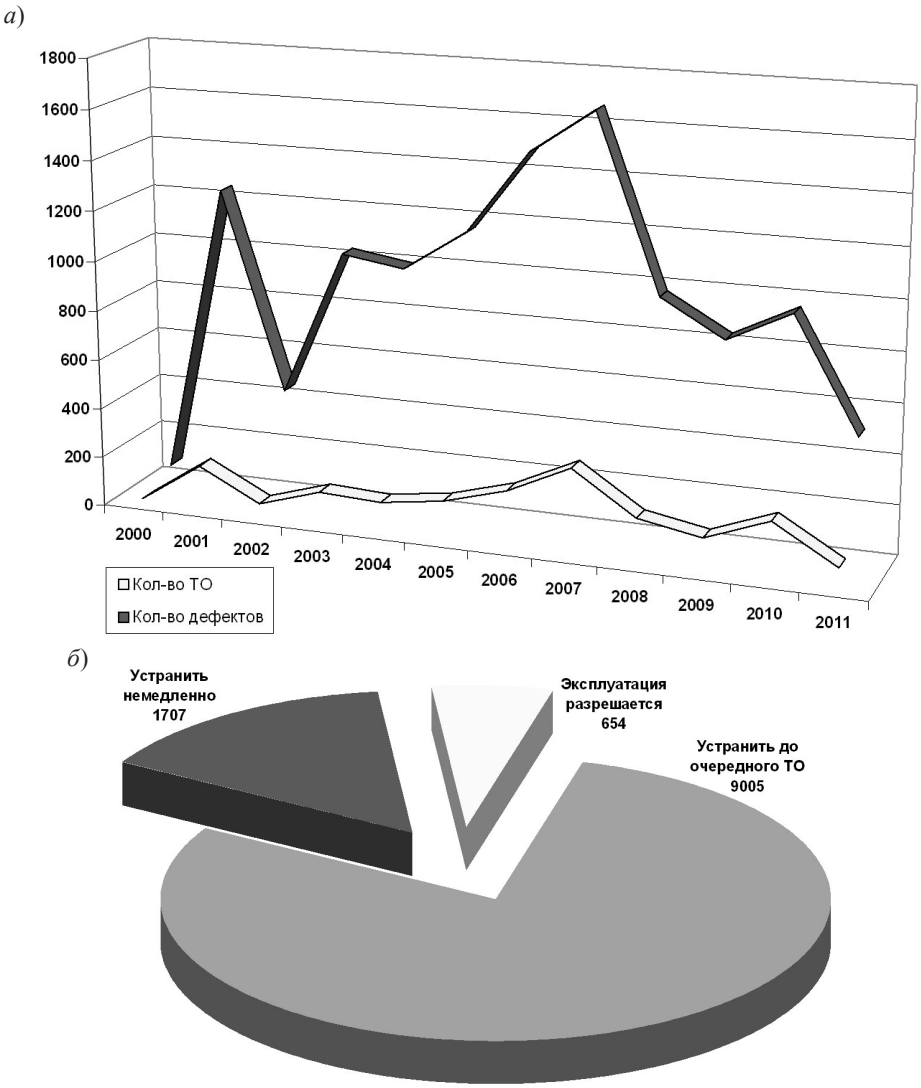


Рис. 4. Статистика проведенных ТО и выявленных дефектов:
а – количество проведенных ТО и выявленных дефектов по годам; *б* – распределение количества дефектов по способам их устранения

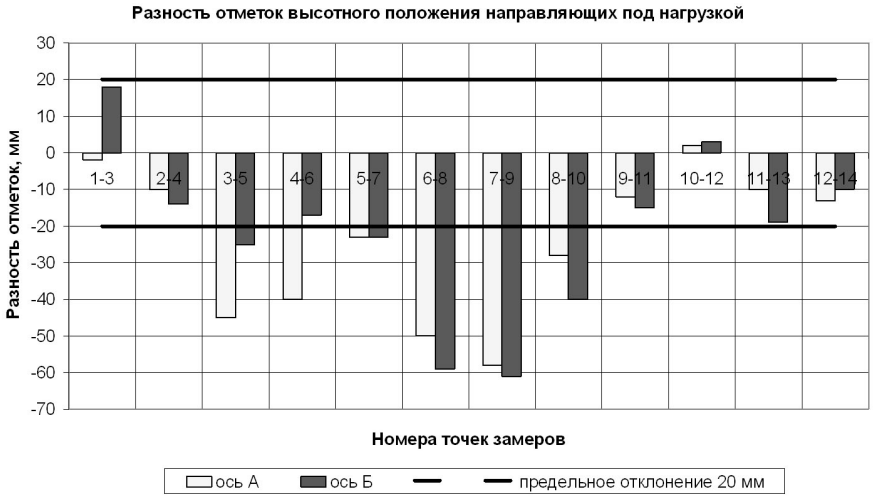


Рис. 5. Средний возраст ГПО и количество выявленных дефектов

На каждом промышленном объекте в среднем выявляется 7 дефектов, при которых дальнейшая эксплуатация ГПО не разрешается, а их максимальное количество доходит до 34. Несмотря на то что средний возраст обследованных кранов в настоящее время составляет 27 лет, количество дефектов старого ГПО почти не отличается от нового (рис. 5).

Важной закономерностью является то, что при нормативном сроке службы 10–16 лет первые дефекты обнаруживаются сразу после ввода в эксплуатацию, что свидетельствует о низком качестве проектирования ГПО, несоблюдении технологии изготовления или нарушении техники безопасности (превышение цикла безостановочной работы, перегрузка, ужесточение режима работы). Это подтверждают замеры, выполненные под нагрузкой, например, портального крана КПП 5-30-6 на складе материалов завода ЖБИ № 5 ПО «Баррикада» от 23.08.2007 г., где было выявлено многократное превышение измеренных значений от предельных отклонений на половине участка кранового пути внутрь пролета (рис. 6).

Как показывает статистика, большая доля дефектов приходится не на сами грузоподъемные машины и механизмы, а на их опорные конструкции и отдельные элементы крановых путей. Именно поэтому мостовые краны имеют относительно больше дефектов и выходят из строя чаще, чем другие наземные и надземные типы ГПО.

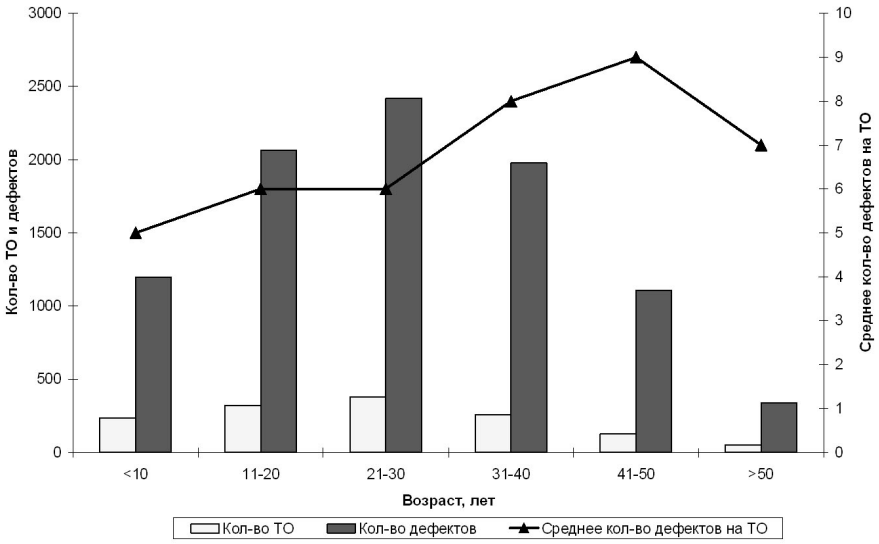


Рис. 6. Отклонение высотного положения направляющих под нагрузкой

Таблица 2

Статистика наиболее слабых элементов и типовых дефектов ГПО

Элемент ГПО	Типовые дефекты	Причины	Кол-во
Путевое оборудование	Тупиковые упоры не соответствуют нормам	Нарушение правил устройства и безопасной эксплуатации	3589
Узлы крепления направляющих	Деформация конструкции узлов крепления. Разрушение сварного шва	Болты не зафиксированы от самоотвинчивания. Низкое качество сварки	2980
Направляющие	Превышение предельно допустимых отклонений (высотного положения, между опорами, колеи, в поперечном сечении)	Превышение предельно допустимых нагрузок. Повышенные сроки эксплуатации и интенсивность работы	2460
Опорные элементы направляющих	Превышение предельно допустимых отклонений (высотного положения, между опорами, колеи, в поперечном сечении)	Превышение предельно допустимых нагрузок. Повышенные сроки эксплуатации и интенсивность работы	1059
Прочие замечания	Недопустимое расстояние от выступающих частей крана. Нет площадки обслуживания крана	Атмосферная коррозия элементов. Нарушение правил устройства и безопасной эксплуатации	279
Электроподвод	Не работает световая сигнализация. Нет видимого заземления. Отсутствует кабелеукладчик	Нарушение правил устройства и безопасной эксплуатации	237
Тормозные конструкции	Отсутствуют тормозные конструкции. Нарушены сварные или болтовые соединения	Механические повреждения. Нарушение правил устройства и безопасной эксплуатации	208
Балластный слой	Недостаточная толщина балластного слоя	Отсутствует часть балластного слоя	57

Наиболее слабыми элементами, их характерными дефектами и причинами их возникновения являются следующие (табл. 2):

для опорных элементов – несовершенство проекта, низкое качество изготовления или монтажа, ослабление конструкции вследствие нарушения режимов работы, интенсивности нагрузки, динамических показателей (таких, как скорость и частота перемещения груза и самого крана), климатических и погодных факторов;

для направляющих, стыковых и промежуточных скреплений – дефекты болтовых и резьбовых соединений, связей и креплений в узлах и стыках, возникшие в процессе коррозии или механических повреждений;

для элементов крановых путей – отклонение от проектного положения (в плане, по высоте, между опорами, наклоны, смещения, прогибы, просадка) в результате интенсивной эксплуатации с предельными нагрузками или по объективным причинам.

Основная ценность БД дефектов ГПО состоит в ее универсальной структуре, позволившей интегрировать данные различных предприятий в единой системе сбора и обработки информации. В процессе промышленной эксплуатации информационная система непрерывно совершенствовалась и в настоящее время содержит результаты ТО, проведенных в течение 12 лет на 95 предприятиях Северо-Западного региона России и ближнего зарубежья.

Проведенный анализ дефектов, накопленных в БД, позволил сформулировать практические рекомендации по промышленной безопасности ГПО. Эксплуатирующим предприятиям следует проводить регулярный контроль технического состояния всех элементов ГПО, их фактических сроков службы и режимов работы; в целях своевременного обнаружения и устранения возможных дефектов привлекать специализированные организации для проведения ТО каждые три года. Экспертным органи-

зациям рекомендовано обращать особое внимание на техническое состояние перечисленных выше элементов крановых путей с учетом нагрузки, ужесточения режимов работы ГПО и других отклонений от норм и правил эксплуатации [5]. Проектным организациям и заводам-изготовителям рекомендовано предусмотреть усиление опорных конструкций ГПО, а также проводить периодический анализ фактической статистики выявленных дефектов с целью повышения надежности и безопасности эксплуатации промышленных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Банных, Г.М.** Комплексное обследование крановых путей грузоподъемных машин: Метод. указания [Текст] / Г.М. Банных, В.В. Зарудный, В.Н. Алексютин [и др.] // Руководящий нормативный документ РД-10-138-97. –М.: Изд-во «Истек», 2004. –20 с. (http://www.snip-info.ru/Rd__10-138-97.htm)

2. **Банных, Г.М.** Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации надземных крановых путей [Текст] / Г.М. Банных, Л.Р. Кудряшов, И.А. Козловский [и др.] // Руководящий нормативный документ РД 50:48:0075.03.05. –М.: НПЦ «Путь К», 2005. –213 с.

3. **Банных, Г.М.** Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации наземных крановых путей [Текст] / Г.М. Банных, В.Г. Жуков, Л.Р. Кудряшов [и др.] // Руководящий нормативный документ РД 50:48:0075.01.05. –М.: НПЦ «Путь К», 2005. –176 с.

4. **Галетин, В.М.** Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы [Текст] / В.М. Галетин, С.П. Голев, В.Г. Жуков [и др.] // Руководящий нормативный документ РД-10-112-3-97. –М.: Изд-во «Истек», 1997. –38 с. (http://snip-info.ru/Rd__10-112-3-97.htm)

5. **Котельников, В.С.** Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов ПБ 10-382-00 [Текст] / В.С. Котельников, Н.А. Шишков, А.С. Липатов [и др.]. –СПб.: ЦОТПБСП, 2000. –129 с. (http://snip-info.ru/Pb_10-382-00.htm)

6. **Мещеряков, С.В.** Эффективные методы проектирования баз данных для задач управления сервисными производственными системами: Дис. … д-ра техн. наук [Текст] / С.В. Мещеряков. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007. –295 с.

7. **Mescheryakov, S.** A Successful Implementation of a Data Structure for Storing Multilevel Objects with Varying Attributes [Электронный ресурс] / S. Mescheryakov // IBM. Developer Works. Information Management. Technical Library. –2002. –Режим доступа: http://www.ibm.com/developerworks/data/zones/informix/library/techarticle/0212mescheryakov/0212mescheryakov.html

УДК 536.422.4, 519.677

Ю.Я. Болдырев, К.Ю. Замотин, Е.П. Петухов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА НАНОПЛЕНОК МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Химическое осаждение из газовой фазы – получение твердых веществ с помощью химических реакций реагентов, подаваемых в реакционную зону в газообразном или плазменном состоянии [1]. Используют для получения текстурированных покрытий, монокристаллов, эпитаксиальных и монокристаллических пленок, нитевидных монокристаллов, порошков, барьерных слоев и др. Выражение «химическое осаждение из газовой фазы» является наиболее точным переводом с английского языка термина chemical vapor deposition (общепринятая аббревиатура – CVD), который был впервые введен Blocher в 1966 г. и с тех пор принят во всем мире.

Появление и бурное развитие микроэлектроники придало мощный импульс для разработки разнообразных CVD технологий. Этим методом получают тонкие пленки металлов, диэлектриков и полупроводников, выращивают монокристаллы и эпитаксиальные пленки. Особо следует подчеркнуть, что необходимость получения пленок заданного состава и с требуемым комплексом физических и химических слоев для применения в электронике обусловила проведение тщательных исследований физико-химических закономерностей процессов, что с неизбежностью привело к более глубокому пониманию сущности и механизмов CVD процессов.

К настоящему времени в мировой практике накоплен большой экспериментальный материал по результатам исследования разнообразных процессов химического осаждения из газовой фазы тонких пленок, нанопорошков, нановолокон, наностержней и наноструктур. Однако, несмотря на тот факт что исследованию некоторых конкретных технологических процессов посвящены сотни и даже тысячи публикаций, их детерминированные модели, достоверно и однозначно описывающие физико-химические закономерности, отсутствуют. Это обусловлено чрезвычайной сложностью механизма CVD процессов, характеризующихся многомаршрутностью химических реакций, присутствием нескольких гомогенных и гетерогенных стадий, а также многоступенчатостью превращений [2, 3]. Используя современные вычислительные технологии удается надежно описывать лишь процессы массо- и теплопереноса, что, в ряде случаев, позволяет успешно оптимизировать и разрабатывать конструкции реакционных камер, применяемых для реализации процессов ХОГФ [4]. Именно на основе таких расчетов, принимая во внимание экспериментально полученные сведения о кинетических закономерностях некоторых конкретных процессов ХОГФ, осуществляется проектирование промышленных реакторов в крупных международных корпорациях (Applied Materials, Samsung Electronics и др.).

Для успешного исследования и моделирования CVD систем необходимы строгие представления о схемах используемых на практике установок, технологических параметрах и их влиянии на условия синтеза, о химии, физике и физикохимии элементарных явлений, сопровождающих синтез, и характере их взаимодействия, иметь экспериментальные данные о процессах и возможности управления ими [5]. Схематично CVD процесс может быть проиллюстрирован рис. 1.

Моделирование CVD процессов базируется на системе уравнений газовой динамики (уравнениях Навье–Стокса) записанной для многокомпонентной реагирующей среды [6]. Кроме того, требуется построение «подмоделей», описывающих химические реакции, турбулентность и теплообмен за счет излучения.

Задача осложняется требованиями расчета температуры и состава смеси, которые сводятся к решению уравнений для компонентов смеси и температуры. Последние остаются незамкнутыми, поскольку требуют определения величины

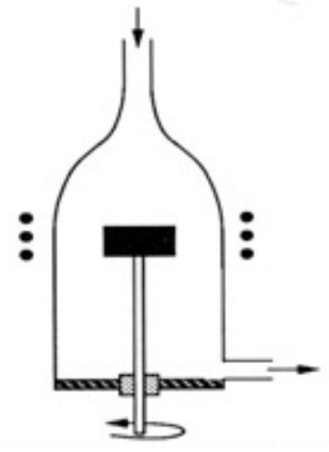


Рис. 1. Схематическое изображение CVD реактора

средней скорости реакции. Таким образом, ее расчет – основная цель химической модели.

Поскольку современные программные комплексы позволяют решать весьма широкий круг междисциплинарных задач, для проведения численного моделирования выбран программный комплекс ANSYS FLUENT [7]. В случае решения уравнения сохранения для химических веществ, этот комплекс получает значение локальной массовой доли каждого вещества Y_i через решение уравнения конвекции-диффузии для i вещества. Запишем уравнение сохранения для i-компоненты в следующем общем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(pY_i) + \nabla \cdot (p\vec{v}Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i, \qquad (1)$$

где R_i – нетто-коэффициент воспроизводства i-компоненты вещества в результате химической реакции; S_i – скорость воспроизводства от добавления из дисперсной фазы с учетом дополнительных источников, задаваемых пользователем.

Уравнение такого вида должно решаться для N–1 химического вещества, где N – общее число химических компонент, представленных в газовой фазе. Поскольку сумма массовых долей всех компонент должна быть тождественно равна единице, то массовая доля N-го компонента будет равна единице минус сумма массовых долей первых N–1 веществ. Чтобы свести к минимуму численные ошибки, в согласии со стандартными подходами N-м веществом должен быть выбрана компонента с наибольшей массовой долей, например N_2 в случае, когда окислителем является воздух.

Отдельно остановимся на проблеме вычислений потока диффузии. В уравнении (1) $\vec{J}_i$ есть поток диффузии компоненты *i*, возникающий в результате появления градиентов концентраций. По умолчанию комплекс ANSYS FLUENT использует так называемую «слабую» аппроксимацию, при которой поток диффузии можно записать в виде:

$$\vec{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i , \qquad (2)$$

где $D_{i,m}$ коэффициент диффузии для *i*-й компоненты смеси.

Подобное приближение не всегда может быть приемлемым, когда требуется моделирование полной многокомпонентной диффузии. В таких случаях к системе может быть добавлено и решено уравнение Максвелла–Стефана.

Скорости реакции, появляющиеся в качестве источниковых членов в уравнении (1), вычисляются по следующей модели: эффект турбулентных флуктуаций игнорируется, и скорость реакции определяется формулой Аррениуса [1]. В рамках данной ламинарной модели конечной скорости вычисляются химические источники в терминах выражения Аррениуса и игнорируются эффекты турбулентных флуктуаций. Модель является точной для ламинарных течений, но, как правило, неточна для турбулентных течений из-за высокой нелинейной химической кинетики Аррениуса. Ламинарная модель, однако, может быть приемлемой для процессов с относительно медленной химической кинетикой и малыми турбулентными флуктуациями

Чистый источник химического вещества *i* определяется как аррениусовская сумма по N_R реакциям, в которую данное вещество входит:

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_r} \hat{R}_{i,r} , \qquad (3)$$

где $M_{w,i}$ – молекулярная масса вещества *I*; $\hat{R}_{i,r}$ – аррениусовская молярная скорость притока/оттока вещества *i* в реакции *r* [12].

При этом реакция может происходить:

в непрерывной фазе;

между веществами в непрерывной фазе;

на поверхности стенки в результате осаждения;

в результате развития данной фазы.

Рассмотрим некоторую реакцию *r*, записанную в общем виде:

$$\sum_{r=1}^{N_r} \nu'_{i,r} M_i \xrightarrow{k_{f,r}} \xleftarrow{k_{b,r}} \sum_{r=1}^{N_r} \nu''_{i,r} M_i , \qquad (4)$$

где *N* – количество химических веществ в системе; $\nu'_{i,r}$ – стехиометрический коэффициент для *i* реагента в реакции *r*; $\nu''_{i,r}$ – стехиометрический коэффициент для *i* продукта в реакции *r*; *M* – символ, обозначающий *i* вещество; $k_{f,r}$ – константа скорости прямой реакции *r*; $k_{b,r}$ – константа скорости обратной реакции *r*.

Уравнение (4) справедливо как для обратимых, так и необратимых реакций, заметим, что по умолчанию реакции не являются обратимыми. Для необратимых реакций константа обратной скорости $k_{b,r}$ опускается.

Суммирование в уравнении (4) производится для всех химических веществ, участвующих в процессе. Но только вещества, появляющиеся в качестве реагентов или продуктов, будут иметь ненулевые стехиометрические коэффициенты. Таким образом, элементы, не участвующие в реакции, выпадают из уравнения.

Для необратимых реакций молярная скорость притока/оттока материала *i* в реакции *r* ($\hat{R}_{i,r}$ в уравнении (3)) дается следующей формулой:

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma(\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^{N} \left[C_{j,r} \right]^{\left(n''_{j,r} + n'_{j,r}\right)} \right), \qquad (5)$$

где $C_{j,r}$ – молярная концентрация *j*-го элемента в реакции *r* (кмоль/м^3); $n'_{j,r}$ – экспонента скорости для *j*-го реагента в реакции *r*; $n''_{j,r}$ – экспонента скорости для *j*-го продукта в реакции *r*.

Для обратимой реакции молярная скорость создания/уничтожения материала *i* в реакции *r* определяется:

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma(\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}) \times \\ \times \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^{N} [C_{j,r}]^{(n'_{j,r})} - k_{b,r} \prod_{j=1}^{N} [C_{j,r}]^{(n''_{j,r})} \right). \qquad (6)$$

Отметим, что показатель скорости для обратной части реакции в уравнении (5) всегда равен стехиометрическому коэффициенту вещества ($\nu''_{j,r}$). Величина Г учитывает влияние от присутствия третьих тел (веществ, не являющихся реагентами в данной реакции, но влияющих на ее протекание) на скорость реакции. Данный член определяется из следующего соотношения:

$$\Gamma = \sum_{j}^{N} \gamma_{j,r} C_j , \qquad (7)$$

где $\gamma_{j,r}$ – коэффициент влияния третьего тела *j*-го

элемента в r-й реакции. По умолчанию комплекс ANSYS FLUENT не включает эффекты влияния третьего тела в процессе расчета скоростей реакций. Можно, однако, принудительно включать в учет влияние третьих тел, когда имеются основания их учитывать.

Переходя к скорости константы прямой реакции r – величине $k_{f,r}$, укажем, что она вычисляется с использованием уравнения Аррениуса:

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT}, \qquad (8)$$

где A_r – предэкспоненциальный множитель (размерная единица); β_r – температурный показатель экспоненты (безразмерная величина); E_r – энергия активации (Дж/кмоль); R – универсальная газовая постоянная (Дж/кмоль-К).

Константы реакций уравнения Аррениуса приведены в таблице.

Для корректной постановки задачи необходимо знать (или получить из базы данных) значения для $v'_{i,r}$, $v''_{i,r}$, $n'_{j,r}$, $n''_{j,r}$, β_r, A_r, E_r, $\gamma_{j,r}$. В том случае, если реакция обратима, константа скорости обратной реакции r, $k_{b,r}$ вычисляется через скорость прямой реакции по следующему соотношению [12]:

$$k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{K_r}, \qquad (9)$$

где K_r – константа равновесия r-й реакции, вычисляемая по формуле:

$$K_r = \exp\left(\frac{\Delta S_r^0}{R} - \frac{\Delta H_r^0}{RT}\right)\left(\frac{p_{\text{atm}}}{RT}\right)^{\sum_{i=1}^{N}(v''_{i,r} - v'_{i,r})}. \qquad (10)$$

В этой формуле величина p_{atm} обозначает атмосферное давление (101325 Па). Показатель степени (в круглых скобках) экспоненциальной функции представляет собой изменение свободной энергии Гиббса, и его компоненты рассчитываются следующим образом [7]:

$$\frac{\Delta S_r^0}{R} = \sum_{i=1}^{N}(v''_{i,r} - v'_{i,r})\frac{\Delta S_i^0}{R}, \qquad (11)$$

$$\frac{\Delta H_r^0}{RT} = \sum_{i=1}^{N}(v''_{i,r} - v'_{i,r})\frac{h_i^0}{RT}, \qquad (12)$$

где величины S_i^0 и h_i^0 – стандартные состояния энтропии и энтальпии (теплоты образования). Эти значения определяются в комплексе ANSYS FLUENT как свойства смеси материала. Свойства энтропии и энтальпии для использованных в работе материалов заданы в полиномиальном формате CHEMKIN [9] и получены из термодинамического справочника [10].

Для моделирования металлорганического процесса химического осаждения из газовой фазы (МО ХОГФ) тонких пленок была выбрана система материалов GaAs в реакционном наборе. Выбор материалов обусловлен тем, что данные полупроводниковые материалы широко используются при получении наногетероструктур, на основе которых создается множество приборов (полевые транзисторы, лазеры, светодиоды и фотоприемники и др.). Приведенная реакционная система уравнений (11), (12) отличается большим количеством реакций, протекающих в объеме и на поверхности. Для каждой реакции, должны быть указаны следующие (взяты из общедоступных источников, табл.) значения параметров:

предэкспоненциальный множитель (A);

показатель температуры (b);

энергия активации (E) для скорости реакции в Аррениусовом виде (9).

В настоящей работе моделирование осаждения нанопленок осуществлено в реакторе вертикального типа с вращающимся диском (рис. 1). Все геометрические размеры реактора (высота, диаметр, высота расположения диска, способ подачи газов в реактор), а также физические (температуры стенок реактора и диска, рабочее давление в реакторе, скорость вращения подложки, расходы газов через входные отверстия) выбраны в соответствии с данными, приведенными в работе [8]. Такой выбор данных позволил обеспечить верификацию полученных результатов, представленных на рис. 2–4, с экспериментальными данными.

Представляется, что главное достижение применяемых технологий математического моделирования – получение всего спектра физических значений (рис. 2, 3) реагирующего газового потока внутри реактора: компоненты скорости, давление, температура, концентрации как исходных, так и результирующих веществ-реагентов. Кроме того, основным результатом моделирования можно считать получение распределения скорости осаждения пленки по площади подложки (рис. 4), находящейся на вращающемся диске, на котором происходит осаждение.

Вместе с тем, несмотря на положительные результаты данного исследования, отсутствие детерминированных моделей, достоверно и однозначно описывающих физико-химические закономерности, является существенной проблемой.

Параметры скоростей реакций

Объемные реакции	A	b	E
TMG => DMG + CH3	1.6E17	0	30057
DMG => MMG + CH3	2.5E15	0	17883
CH3 + H2 => CH4 + H	1.2E9	0	6300
ASH3 + CH3 = ASH2 + CH4	9.7E8	0	900
TMG + H = DMG + CH4	5.0E10	0	5051
DMG + H => MMG + CH4	5.0E10	0	5051
2H + M = H2 + M	1.0E13	0	0
2CH3 = C2H6	2.0E10	0	0
CH3 + H + M => CH4 + M	2.4E19	-1	0
TMG + CH3 => ADDUCT + CH4	2.0E8	0	5051
MMG => GA + CH3	1.0E16	0	39052
Поверхностные реакции			
H + OPENAS(S) => H_AS(S)	4.95E9	0.5	0
H + OPENG(S) => H_G(S)	4.95E9	0.5	0
CH3 + OPENG(S) = CH3_G(S)	1.27E9	0.5	0
CH3 + OPENAS(S) = CH3_AS(S)	1.27E9	0.5	0
MMG + OPENAS(S) = MMG_AS(S)	5.37E8	0.5	0
DMG + OPENAS(S) => MMG_AS(S) + CH3	4.95E8	0.5	0
ASH + OPENG(S) = ASH(S)	5.68E8	0.5	0
ASH2 + OPENG(S) => ASH(S) + H	5.68E8	0.5	0
ASH3 + OPENG(S) => ASH(S) + H2	5.68E8	0.5	0
CH3 + H_AS(S) => CH4 + OPENAS(S)	1.26E8	0.5	0
CH3 + H_G(S) => CH4 + OPENG(S)	1.26E8	0.5	0
H + CH3_AS(S) => CH4 + OPENAS(S)	4.94E8	0.5	0
H + CH3_G(S) => CH4 + OPENG(S)	4.94E8	0.5	0
H_AS(S) + CH3_G(S) => CH4 + OPENAS(S) + OPENG(S)	1.0E16	0	5051
H_G(S) + CH3_AS(S) => CH4 + OPENAS(S) + OPENG(S)	1.0E16	0	5051
H_G(S) + H_AS(S) => H2 + OPENAS(S) + OPENG(S)	1.2E16	0	10102
CH3_G(S) + CH3_AS(S) => C2H6 + OPENAS(S) + OPENG(S)	1.0E16	0	10102
MMG_AS(S) + ASH(S) => CH4 + OPENG(S) + OPENAS(S) + GAAS(B)	5.0E17	0	14801
MMG_AS(S) + AS(S) => CH3 + OPENG(S) + OPENAS(S) + GAAS(B)	5.0E17	0	10103
2ASH(S) => AS2 + H2 + 2OPENG(S)	1.0E16	0	19681
CH3 + ASH(S) => AS(S) + CH4	1.28E8	0.5	10103
2AS(S) = AS2 + 2OPENG(S)	1.0E17	0	15155
TMG + OPENAS(S) => MMG_AS(S) + 2CH3	4.62E8	0.5	0
GA + OPENAS(S) = GA(S)	5.9E8	0.5	0
GA(S) + AS(S) => OPENAS(S) + OPENG(S) + GAAS(B)	1.1E9	0	505

Как уже отмечалось, данное обстоятельство обусловлено чрезвычайной сложностью механизма CVD процессов, характеризующихся многомаршрутностью химических реакций, присутствием нескольких гомогенных и гетерогенных стадий, а также многоступенчатостью превращений.

По результатам исследования можно утверждать, что выбранные модели физико-химических процессов адекватно описывают реагирующее течение газовой среды и тех инструментов, на основе которых реализуется синтез наноразмерных структур и наноматериалов (подложки). Результаты моделирования осаждения GaAs легко согласуются с экспериментальными данными [8] как количественно, так и качественно.

Использование высокопроизводительных вычислительных технологий позволило расширить круг решаемых задач в области нанотехнологий путем математического моделирования различных технологических инструментов/оборудования, (установки химического осаждения из газовой фазы), технологических параметров (температуры подложки, рабочего давления и др.), а также различных материалов (пленки, порошки и др.).

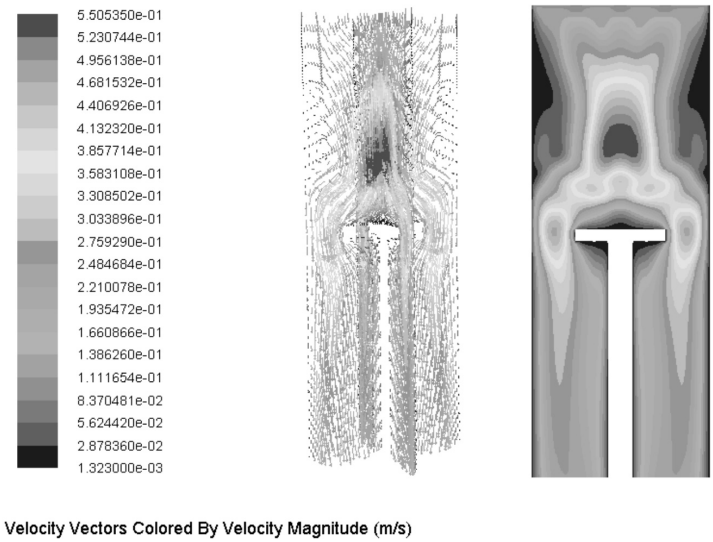


Рис. 2. Скорость потока внутри реактора

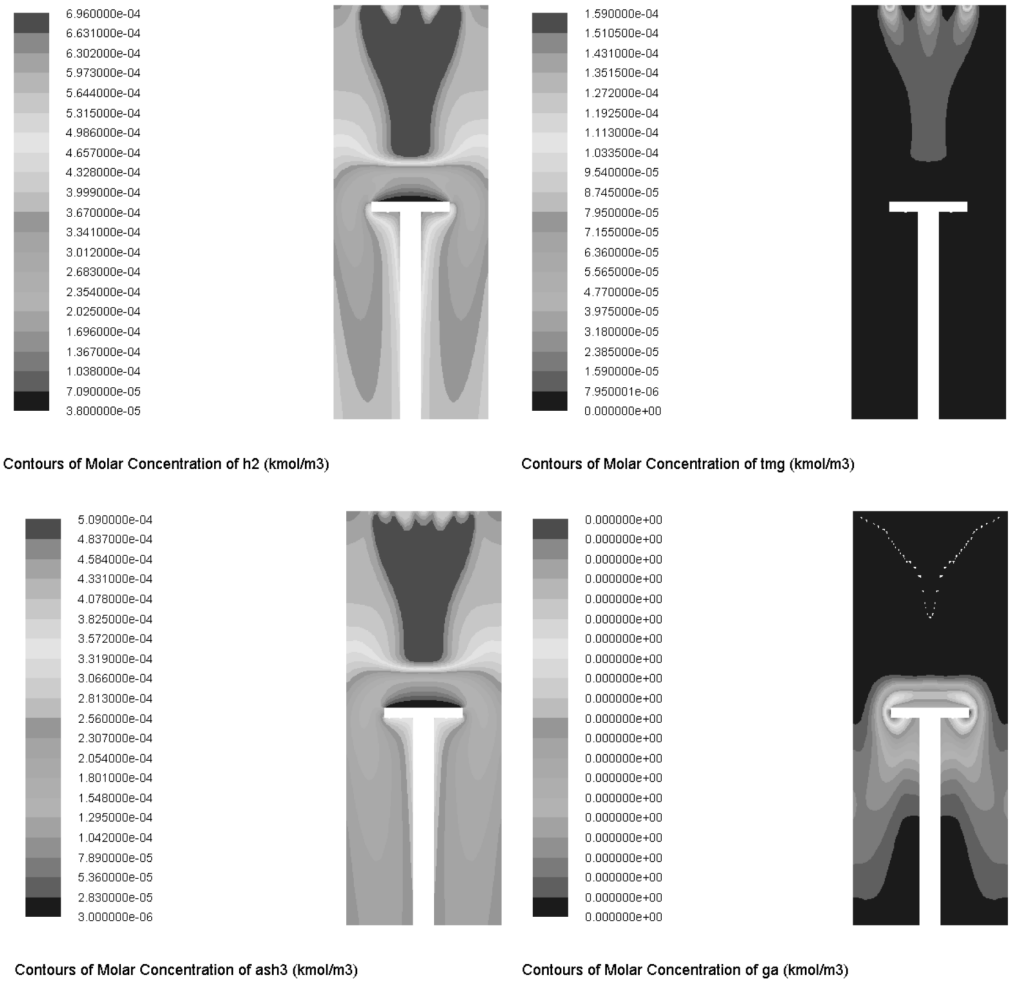


Рис. 3. Молярные концентрации компонент смеси

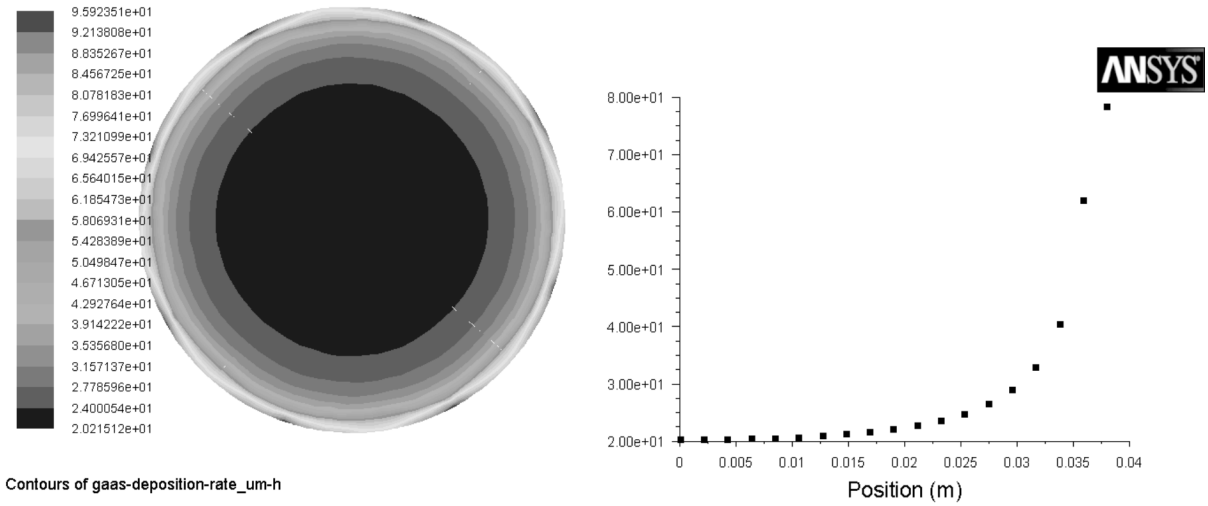


Рис. 4. Скорость осаждения арсенида галлия

Использование технологий математического моделирования на базе высокопроизводительных вычислений позволяет получать информацию о процессе ХОГФ и произведенном продукте за короткое время (в пределах нескольких лабораторных работ) и не требует применения дорогостоящего оборудования, отсутствующего в большинстве учебных заведений. При этом отметим, что весьма важную роль в образовательном процессе с использованием виртуальных лабораторных практикумов играют технологии удаленного доступа к среде моделирования [11].

Работа выполнена в рамках госконтракта с Министерством образования и науки № 16.647.12.2020 от 25.11.2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chemical Vapour Deposition. Precursors, Processes and Application [Text] / Eds. A.C. Jones, M.L. Hitchman. –London: RSC Publishing, 2009. –582 p.

2. **Протопопова, В.С.** Химическое осаждение из газовой фазы слоев ni из бис - (этилциклопентадиенил) никеля [Текст] / В.С. Протопопова, С.Е. Александров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Физико-математические науки. –2001.

3. **Уваров, А.А.** Химическое осаждение из газовой фазы диэлектрических пленок политетрафторэтилена [Текст] / А.А. Уваров, С.Е. Александров // Научно-Технические ведомости СПбГПУ. Сер. Физико-математические науки. –2011. –№ 4.

4. **Александров, С.Е.** Технология материалов электронной техники. Процессы химического осаждения из газовой фазы: Учеб. пособие [Текст] / С.Е. Александров. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. –92 с.

5. Chemical Vapor Deposition, Principals and Application [Text] / Eds. M.I. Hitchman, K.F. Jencen. –London: Academic Press, 1993. –678 p.

6. **Лойцянский, Л.Г.** Механика жидкости и газа. Учеб. для вузов [Текст] / Л.Г. Лойцянский; Изд. 6-е, перераб. и доп. –М.: Наука, 1987. –600 с.

7. FLUENT 6.3 User's Guide [Электронный ресурс]

8. **Mazumder, S.** The importance of predicting rate-limited growth for accurate modelling of commercial MOCVD reactors Text / S. Mazumder, S. Lowry // J. Crystal Growth. –2001. –№ 224. –165 p.

9. CHEMKIN/CHEMKIN-PRO Input Manual (Aug. 2010) [Электронный ресурс]

10. NIST-JANAF Thermochemical Tables [Text] / 4th Ed. M. Chase // Monograph, 1998. –Vol. 2. –№ 9. –1952 p.

11. **Иванов, Д.И.** Визуализация результатов моделирования процессов газофазного синтеза наноразмерных структур при сетевом доступе к кластерному вычислителю [Текст] / Д.И. Иванов, Н.В. Захаревич, И.А. Цикин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 6–2 (138).

12. **Laidler, K.J.** Chemical Kinetics [Text] / K.J. Laidler; 3 Ed. –Benjamin-Cummings,1997.

УДК 519.6

Д.Г.Арсеньев, В.М. Иванов, Н.А. Берковский

ЭФФЕКТИВНЫЙ ВЫБОР ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ СЕТКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О СЛЕЖЕНИИ ПО АЗИМУТУ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Задача о слежении по азимуту возникает в случаях, когда измерение расстояний от наблюдателя до объекта по каким-либо причинам невозможно или нежелательно. Этими причинами могут быть, например, дороговизна соответствующего оборудования или, в случае гидроакустических наблюдений, желание наблюдателя не обнаруживать свое местоположение посредством акустических волн, исходящих из точки локализации.

Последнее время этой задаче посвящено значительное число работ [5, 6, 8], в которых она, как правило, решается при помощи частичных фильтров (particle filters), в частности, различными модификациями схемы bootstrap filter [5]. Отметим, что задача является нелинейной задачей оптимального оценивания. [3, 4].

В настоящей работе применяется непосредственное интегрирование и предлагается новый, более эффективный метод выбора плотности распределения точек при вычислении интегралов в соответствии со схемой выборки по важности (important sampling) [5] в байесовском оценивании. С помощью этого метода при достаточно реалистичных предположениях об измерительном шуме и при условии малости системного шума задача решается значительно быстрее и точнее, чем немодифицированными последовательными методами Монте-Карло или методом выборки по важности при обычном для байесовского оценивания выборе плотности распределения узлов сетки.

Постановка задачи

Рассматривается задача оптимального оценивания с дискретным временем. Пусть наблюдаемый объект с координатами (x, y) движется по плоскости в соответствии со стандартной моделью [6] вида:

$$\mathbf{x}_k = \Phi \mathbf{x}_{k-1} + \Gamma \mathbf{w}_k, \; k \in N, \qquad (1)$$

где $\mathbf{x}_k = (x, \dot{x}, y, \dot{y})_k^T$, $\mathbf{w}_k = (w_x, w_y)_k^T$, $\mathbf{\Phi} = \begin{pmatrix} 1 & t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{\Gamma} = \begin{pmatrix} 0{,}5t & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0{,}5t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, t – шаг по времени, равный интервалу между измерениями.

Системный шум (w_x, w_y) будем считать гауссовским белым шумом с средним значением (0,0) и матрицей ковариации qE, где $q > 0$, E –двумерная единичная матрица. Пусть наблюдатель находится в начале координат и совершает измерения z_k, которые зашумлены и определяются формулой:

$$z_k = \tan^{-1}\left(y_k / x_k \right) + v_k, \; k \in N, \qquad (2)$$

где измерительный шум v – также гауссовский белый шум с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением r. Кроме того, известно априорное распределение вектора состояния в «нулевой» момент времени, в данной статье это нормальное распределение со средним (x^0, y^0) и ковариационной матрицей σE для начального положения и равномерное распределение в квадрате $S = [a_x, b_x] \times [a_y, b_y] \in R^2$ для начальных компонент скорости. При этом считаем, что начальные координаты и скорости взаимно независимы.

Требуется, располагая рядом измерений $\mathbf{z}_{1:k} = \{z_1, z_2, ..., z_k\}$ в k-й момент времени и знанием априорного распределения вектора состояния $\mathbf{x}_0 = (x, \dot{x}, y, \dot{y})_0^T$, приближенно найти апостериорное среднее значение $E_{p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{z}_{1:k})}[\mathbf{x}_{0:k}]$ случайного процесса $\mathbf{x}_{0:k} = (x, \dot{x}, y, \dot{y})_{0:k}^T$, где $\mathbf{x}_{0:k} = \{\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, ..., \mathbf{x}_k\}$, а $p(\mathbf{x}_{0:k} \mid \mathbf{z}_{1:k})$ – апостериорная плотность. Здесь придерживаемся обозначений, принятых в теории байесовского оценивания [5].

Примером реальной ситуации, отвечающей этой модели, может быть слежение за подводной лодкой. Начальное положение оценивается с помощью измерения пеленга (азимута) и дальности гидроакустическими приборами, отсюда получаем априорное распределение. Затем дальномер от-

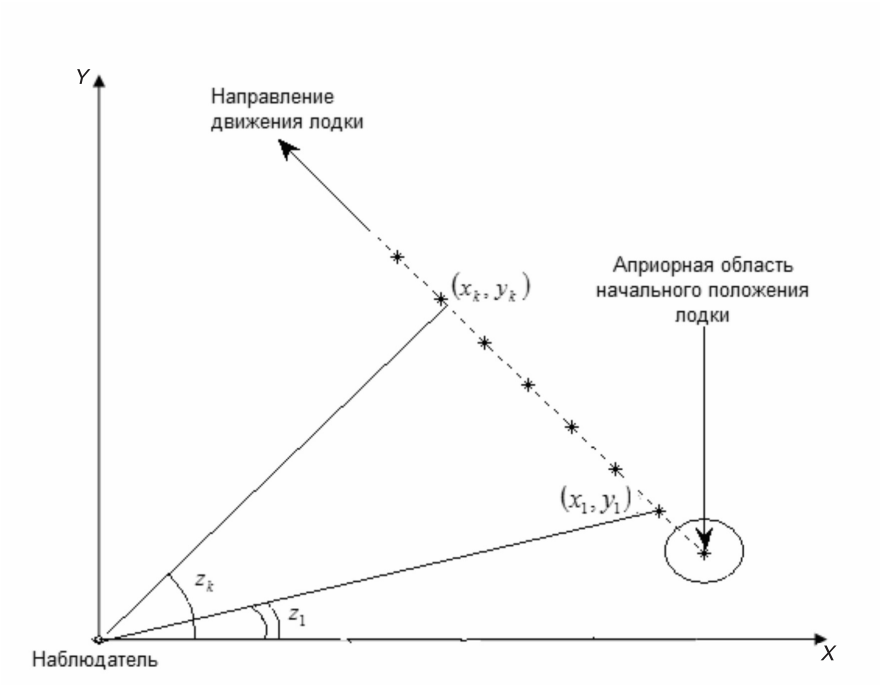


Рис. 1. Постановка задачи слежения по азимуту

ключается, чтобы не выдать местоположение наблюдателя и измеряется только пеленг (рис. 1). Предполагается, что лодка движется равномерно и прямолинейно с небольшими отклонениями от курса в силу случайных причин (системный шум).

Отметим, что результатом байесовского оценивания является апостериорная средняя траектория лодки, вычисленная по итогам полученных измерений (2) с учетом соотношений (1). Эта траектория не обязана совпадать с истинной траекторией лодки, но при достаточном числе измерений и небольших шумах весьма близка к ней.

В момент времени k имеем байесовскую оценку для средней траектории в виде [3, 5]:

$$E_{p(\mathbf{x}_{0:k}|\mathbf{z}_{1:k})}[\mathbf{x}_{0:k}] = \frac{\int \mathbf{x}_{0:k}\, p(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{0:k}) p(\mathbf{x}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k}}{\int p(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{0:k}) p(\mathbf{x}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k}}, \quad (3)$$

где $p(\mathbf{x}_{0:k})$ – априорное распределение траекторий, определяемое начальным распределением вектора состояния и распределениями системных шумов. Интегралы в общем случае имеют кратность $k + 4$ и при большом количестве измерений k их приближенное вычисление является проблемой.

Выбор плотности распределения для скоростей

Вначале исследуется вспомогательная задача без системного шума с известной начальной точкой, т. е. модель вида

$$\mathbf{x}_k = \Phi \mathbf{x}_{k-1}\ ,\ \mathbf{x_0} = (x^0, \dot{x}, y^0, \dot{y}), \quad (4)$$

где (x^0, y^0) – фиксированная начальная точка, а вектор скоростей $(\dot{x}, \dot{y})$ равномерно распределен в квадрате S. В этом случае интегралы в (3) будут двукратными, а знаменатель будет равен:

$$\int p(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{0:k}) p(\mathbf{x}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k} = \\ = \int_S |S|^{-1} \prod_{i=1}^{k} (2\pi r^2)^{-0,5} \exp\times \\ \times \left[-\left(z_i - \tan^{-1}\left(\frac{y^0 + \dot{y}it}{x^0 + \dot{x}it} \right) \right) \cdot (2r^2)^{-0.5} \right] d\dot{x} d\dot{y}. \quad (5)$$

График подынтегральной функции из (5) показан на рис. 2

Как видно из рис. 2, эта функция имеет единственный резкий максимум. Хотя ее график и напоминает внешне нормальное распределение, в общем случае она асимметрична и имеет ненулевой эксцесс.

Предположим, что мы приближенно вычисляем числитель и знаменатель в (3) методом Монте-Карло и используем дельта-метод [2, 7] для оценки частного. Действуя классическим методом important sampling, для генерации случайной сетки следовало бы использовать

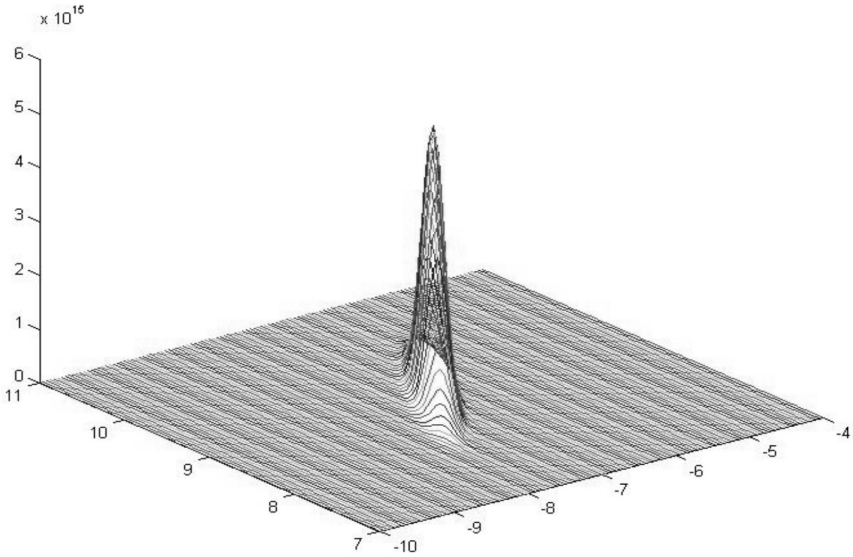


Рис. 2. Типичный график апостериорной плотности для скоростей

равномерное распределение в квадрате. Однако численные эксперименты и теоретические соображения показывают, что для уменьшения количества итераций очень хорошим выбором является распределение, пропорциональное всей подынтегральной функции в (5). К сожалению, оно, по всей видимости, недоступно для эффективного моделирования, например, в методе отбора затруднительно найти более или менее точную мажоранту, и подавляющее большинство генерируемых точек не проходит отбор, соответственно, время счета сильно увеличивается. Классический же метод important sampling дает большое время из-за большой дисперсии числителя и знаменателя при вычислениях. Следовательно, целесообразно найти некоторый промежуточный вариант, при котором дисперсия значительно меньше, чем при равномерной генерации, но существует достаточно эффективный метод моделирования случайной сетки. В данной статье этим вариантом является двумерное нормальное распределение со средним значением и ковариационной матрицей, способ нахождения которых описан ниже.

Решаем систему неравенств относительно координат точки $(\dot{x}, \dot{y}) \in S$:

$$\begin{cases} (2\pi r^2)^{-0,5} \exp\left[-\left(z_i - \tan^{-1}\left(\dfrac{y^0 + \dot{y}it}{x^0 + \dot{x}it} \right) \right) \cdot (2r^2)^{-0,5} \right] \geq c, \quad i = 1, 2 \ldots k \\ (\dot{x}, \dot{y}) \in S \end{cases}, \tag{6}$$

где $c > 0$ − некоторое достаточно малое число (в численных примерах в настоящей работе оно принято равным 0,05). Имеем всего $k + 2$ неравенств.

Если предположить, что

$$\dot{x} \geq -x^0 (it)^{-1}, \quad i = 1, 2 \ldots k, \tag{7}$$

то из (6) можно прийти к системе неравенств

$$\begin{cases} a_i \dot{x} + \dfrac{a_i x^0}{it} - y^0 \leq \dot{y} \leq b_i \dot{x} + \dfrac{b_i x^0}{it} - y^0 \quad i = 1, 2 \ldots k \\ (\dot{x}, \dot{y}) \in S \end{cases}, \tag{8}$$

где $a_i = \tan(z_i - r\sqrt{2\ln(c(2\pi r^2)^{0,5})^{-1}})$ и $b_i = \tan(z_i + r\sqrt{2\ln(c(2\pi r^2)^{0,5})^{-1}})$.

Ввиду линейности относительно $\dot{x}$ и $\dot{y}$ двойных неравенств системы (8), множество решений системы (8), если оно существует, будет представлять собой некоторый многоугольник. На рис. 3 изображена типичная ситуация в случае когда все положения объекта наблюдатель видит под углом от нуля до 90 градусов. При этом скорости равномерно распределены в квадрате $S = [-10, 10] \times [-10, 10]$, число измерений равно 15, из-за этого так много прямых на рисунке. Для наглядности показана только часть квадрата S, в которой лежит область решений системы неравенств (8).

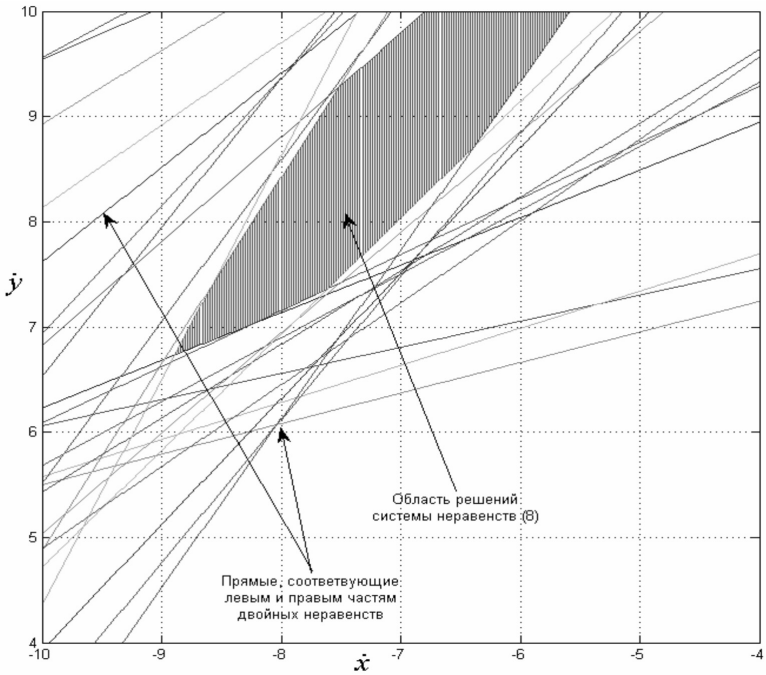


Рис. 3. Многоугольная область решений системы неравенств (8)

Предположим, что нам известны координаты достаточного числа точек, удовлетворяющих системе неравенств (8) (технически они легко находятся с помощью простой и быстрой подпрограммы). Располагая этим «облаком точек», как принято говорить в статистике, мы можем найти выборочное среднее $\bar{\dot{\mathbf{x}}} = (\bar{\dot{x}}, \bar{\dot{y}})$, а также ковариационную матрицу $\Sigma_{\dot{\mathbf{x}}}$ этого облака.

Далее, в качестве плотности для генерации случайной сетки при вычислении методом Монте-Карло интегралов из (3) возьмем усеченное нормальное распределение вида:

$$p_{\dot{\mathbf{x}}}(\dot{\mathbf{x}}) = \mathrm{N}(\dot{\mathbf{x}}, \bar{\dot{\mathbf{x}}}, h \cdot \Sigma_{\dot{\mathbf{x}}}) \cdot \chi_S, \qquad (9)$$

где $\dot{\mathbf{x}} = (\dot{x}, \dot{y})$, χ_S – характеристическая функция квадрата, $h > 0$ – параметр, а $\mathrm{N}(\dot{\mathbf{x}}, \bar{\dot{\mathbf{x}}}, \Sigma_{\dot{\mathbf{x}}})$ здесь и далее обозначает функцию плотности нормального распределения с аргументом $\dot{\mathbf{x}}$, средним $\bar{\dot{\mathbf{x}}}$ и ковариационной матрицей $\Sigma_{\dot{\mathbf{x}}}$. В отличие от распределения, пропорционального выражению $\prod_{i=1}^{k} \exp\left[-\left(z_i - \tan^{-1}\left(\frac{y^0 + \dot{y}it}{x^0 + \dot{x}it}\right)\right) \cdot (2r^2)^{-0,5}\right]$ из (5), это распределение моделируется эффективно. В то же время оно сгущает случайную сетку в районе точки максимума апостериорной плотности (рис. 2 и 4).

Управляя параметрами *c* и *h*, можно еще больше уменьшить дисперсию. Отметим, что в случае, когда многогранник области решений системы (8) имеет вид треугольника с прямым углом в вершине квадрата, (что достаточно редко), то вместо нормального распределения лучше использовать асимметричные параметрические распределения, поддающиеся эффективному моделированию. В данной статье эти ситуации не рассматриваются.

Теперь перейдем к решению задачи (3) при условии отсутствия системных шумов. В этом случае интегралы в (3) становятся четырехкратными, а знаменатель имеет вид:

$$\begin{aligned} &\int p(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{0:k}) p(\mathbf{x}_{0:k}) d\mathbf{x}_{0:k} = \\ &= \int_S |S|^{-1} \prod_{i=1}^{k} (2\pi r^2)^{-0,5} \exp\times \\ &\times \left[-\left(z_i - \tan^{-1}\left(\frac{y + \dot{y}it}{x + \dot{x}it}\right)\right) \cdot (2r^2)^{-0,5}\right] \times \\ &\times \mathrm{N}(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{x}}^0, \Sigma_{\vec{\mathbf{x}}}) d\dot{x} d\dot{y} d\vec{\mathbf{x}}, \end{aligned} \qquad (10)$$

где $\vec{\mathbf{x}} = (x, y)$, $\vec{\mathbf{x}}^0 = (x^0, y^0)$ и $p_{\vec{\mathbf{x}}}(\vec{\mathbf{x}})$ – априорная плотность распределения вектора координат объекта. Принимая во внимание изложенные выше соображения, в качестве плотности для генерации случайных точек рационально взять плотность

$$p_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) = \mathrm{N}(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{x}}^0, \Sigma_{\vec{\mathbf{x}}}) p_{\dot{\mathbf{x}}}(\dot{\mathbf{x}}), \qquad (11)$$

где $p_{\dot{\mathbf{x}}}(\dot{\mathbf{x}})$ определена равенством (9). Заметим, что в случае классической схемы important

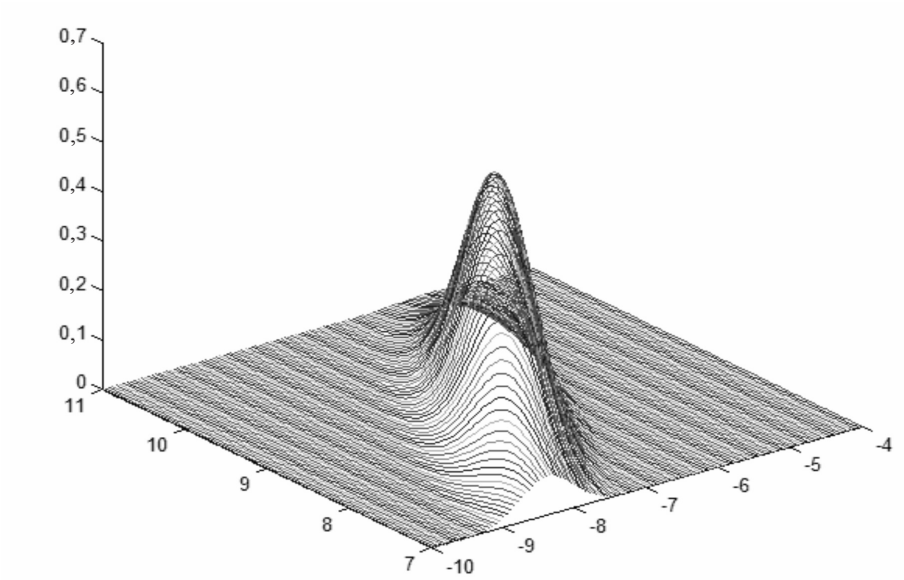


Рис. 4. График подобранного нормального распределения при $h = 1$, соответствующий плотности из рис. 2

sampling [5] соответствующая плотность имеет вид

$$p_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) = \mathrm{N}(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{x}}^0, \Sigma_{\vec{\mathbf{x}}})\left|S\right|^{-1}. \qquad (12)$$

Далее, экстраполируем эти же соображения на общую задачу с системным шумом.

Отметим, что для того чтобы оценить траекторию объекта, достаточно оценить начальное положение, начальную скорость, а также процесс системного шума $\mathbf{w}_{1:k} = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, ..., \mathbf{w}_k\}$. По оцененным значениям системных шумов, легко восстановить траекторию, пользуясь соотношениями модели (1). Введем вектор $\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0 = (x^0, \dot{x}^0, y^0, \dot{y}^0, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, ..., \mathbf{w}_k)$, подразумевая, что каждое вхождение $\mathbf{w}_i$ обозначает две компоненты соответствующего системного шума, т. е. вектор $\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0$ имеет размерность $2k+4$. Дополнительно введем вектор $\mathbf{l}_i = (i-0{,}5, i-1{,}5, ..., 0{,}5)^T$ и обозначим как $\mathbf{w}_x^i$ и $\mathbf{w}_y^i$ векторы, состоящие из первых и вторых компонент векторов $\mathbf{w}_j$, где j меняется от единицы до i, а i – от единицы до k. Требуется вычислить байесовскую оценку вектора $\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0$ по формуле:

$$E_{p(\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0|\mathbf{z}_{1:k})}[\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0] = \frac{\int \mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0 p(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0) p(\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0) d\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0}{\int p(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0) p(\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0) d\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0}, \qquad (13)$$

причем

$$p(\mathbf{z}_{1:k} \mid \mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0) = \prod_{i=1}^{k} (2\pi r^2)^{-0,5} \exp\times \qquad (14)$$

$$\times\left[-\left(z_i - \tan^{-1}\left(\frac{y + \dot{y}it + t\mathbf{w}_y^i \mathbf{l}_i}{x + \dot{x}it + t\mathbf{w}_x^i \mathbf{l}_i}\right)\right)\cdot (2r^2)^{-0,5}\right].$$

Априорная плотность $p(\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0)$ является произведением равномерной плотности для начальных скоростей, нормальных плотностей для начальных координат и $2k$ шумов. Таким образом, требуется вычислить $2k + 4$ интеграла размерности $2k + 4$. Действуя по классической схеме important sampling, в качестве плотности для генерации случайной сетки следует взять функцию

$$p_{\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0}(\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0) = \mathrm{N}(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{x}}^0, \Sigma_{\vec{\mathbf{x}}}) p_{\dot{\mathbf{x}}}(\dot{\mathbf{x}}) \prod_{i=1}^{k} \mathrm{N}(\mathbf{w}_i, (0,0), qE). \qquad (15)$$

Вычисляя интеграл предлагаемым методом, для генерации случайной сетки берем плотность

$$p_{\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0}(\mathbf{x}_{\mathbf{w}}^0) = \mathrm{N}(\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{x}}^0, \Sigma_{\vec{\mathbf{x}}})\left|S\right|^{-1} \prod_{i=1}^{k} \mathrm{N}(\mathbf{w}_i, (0,0), qE). \qquad (16)$$

Таким образом, (15) и (16) различаются только способом генерации случайных сеток для начальных скоростей, однако, как показано ниже в разделе численных экспериментов, при малых системных шумах это отличие имеет решающее значение. Отметим, что перспективной представляется возможность адаптивного управления параметрами c и h в предлагаемой схеме с привлечением теории, развитой в [1].

Результаты численного эксперимента

Ниже приведены результаты решения двух

Таблица 1

Сравнение методов при отсутствии системного шума

Метод	Предлагаемый метод с эффективно выбранной плотностью	Метод выборки по важности	Частичный фильтр
Число итераций	10 000	380 000	--------
Время, с	4	95	368

задач. Первая задача – это задача о слежении по азимуту при условии нулевого системного шума. Среднеквадратические отклонения модели равны $r = 1°$, $\sigma = 10$ м, шаг по времени $t = 5$ с, параметр $h = 1$. Количество измерений равно 15. Начальные скорости, измеряемые в м/с, равномерно распределены в квадрате $S = [-10,10] \times [-10,10] \in R^2$.

Байесовская оценка моделируемых траекторий вычислялась тремя методами: классическим методом выборки по важности для байесовского оценивания с плотностью случайной сетки, определяемой формулой (12), предлагаемым методом с эффективно выбранной плотностью, определенной по (11), и при помощи частичного фильтра (немодифицированная схема bootstrap filter [5]), использующего 20000 частиц.

Расчет проводился на доверительном уровне 95 % с точностью 1 м для координат начального положения и 0,1 м/с для начальных скоростей.

Результаты моделирования показаны на рис. 5 и в табл. 1, из которых видим, что средние траектории, полученные предложенным методом и методом important sampling, совпадают, как и следовало ожидать. Кроме того, они ближе к истинной траектории, чем траектория, оцененная методом bootstrap filter. Поскольку схема bootstrap filter использует дискретные аппроксимации априорной и апостериорной плотности на каждом шаге по времени, ошибка накапливается. Причина столь долгого выполнения bootstrap filter – необходимость моделирования дискретного распределения с большим числом частиц на каждом шаге при

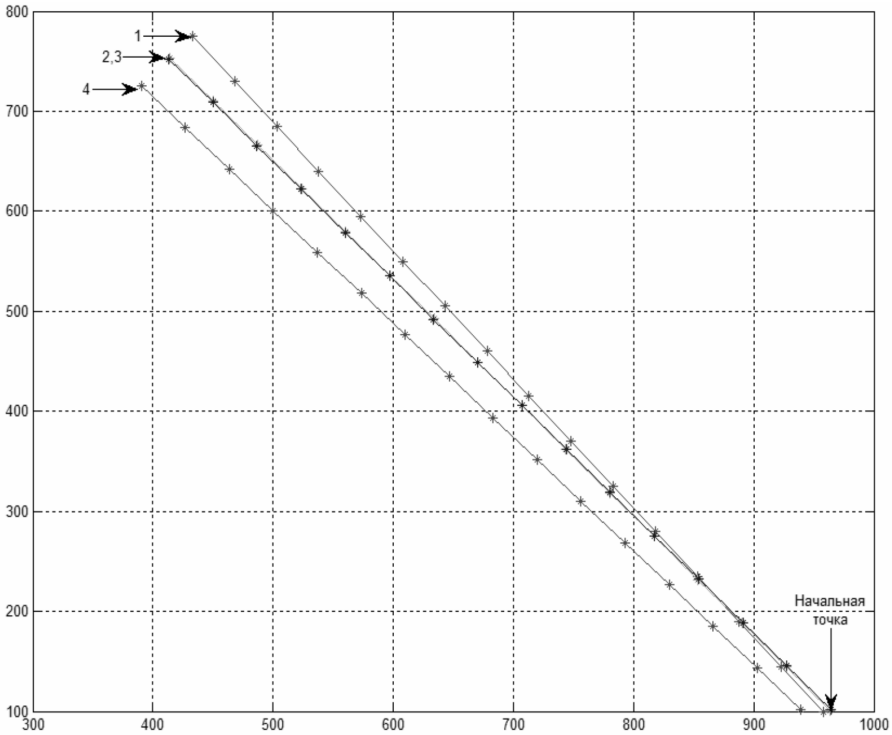


Рис. 5. Задача без системного шума
1 – траектория объекта; 2 – оценка методом выборки по важности; 3 – оценка предложенным методом; 4 – оценка, использующая частичный фильтр

Таблица 2

Сравнение методов при наличии малого системного шума

Метод	Предлагаемый метод с нулевым системным шумом	Предлагаемый метод с учетом системного шума	Метод выборки по важности	Частичный фильтр
Число итераций	10 000	620 000	6 770 000	--------
Время, с	6	758	6 970	5 601

«перевыборе» частиц. Именно на эту процедуру программа тратит основное время. Из табл. 1 видим, что предложенный метод значительнее эффективнее двух других как в отношении времени работы, так и в отношении количества итераций при сравнении с important sampling.

Вторая задача – это задача о слежении по азимуту с малым системным шумом. Значения параметров те же, что и в предыдущей задаче, но $h = 8$, это оказался наиболее оптимальный вариант. Дополнительно вводился системный шум со среднеквадратическим отклонением q = 0,1 м/с. Расчет проводился на доверительном уровне 95 % с точностью 2 м для координат начального положения, 0,1 м/с для начальных скоростей и 0,01 м/с для системных шумов на каждом шаге. Для оценки точности частного интегралов использовался дельта-метод [7].

Подчеркнем, оценки точности относятся только к предложенному методу и методу выборки по важности, т. к. в частичном фильтре из-за фиксированного числа частиц отсутствует возможность счета до заранее определенного значения погрешности. Кроме того, осуществлен расчет предлагаемым методом, с пренебрежением системного шума, для выяснения, насколько байесовские оценки будут различаться.

Результаты моделирования показаны на рис. 6 и в табл. 2, из которых видно, что траектории, оцененные предлагаемым методом и методом выборки по важности, снова совпадают. Менее точно повторяет истинную траекторию оценка, получен-

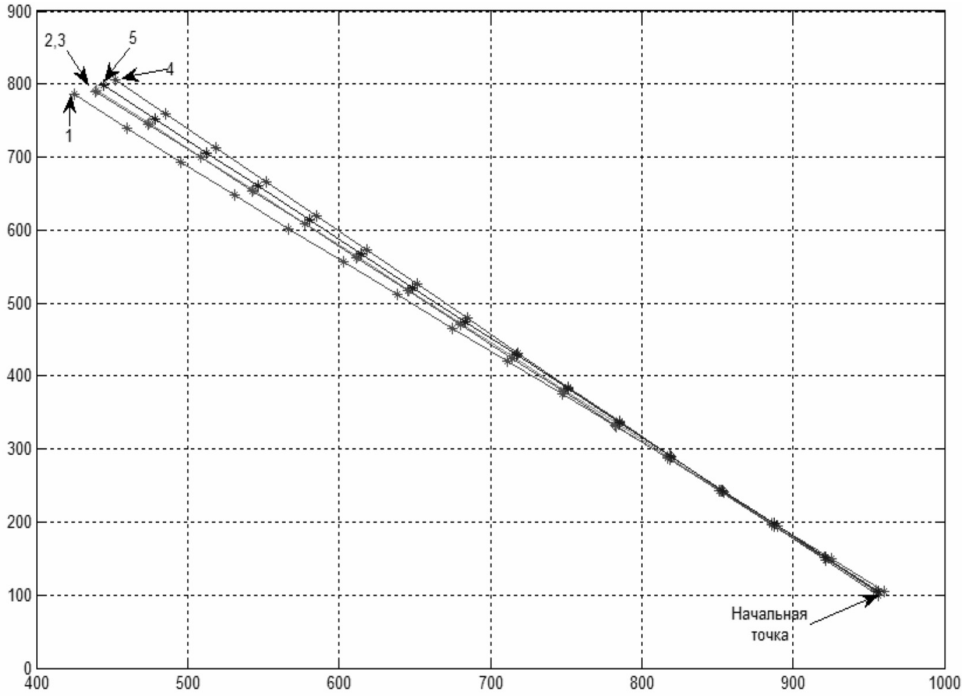


Рис. 6. Задача с малым системным шумом
1 – траектория объекта; 2 – оценка методом выборки по важности; 3 – оценка предложенным методом; 4 – оценка, использующая частичный фильтр; 5 – решение предложенным методом с нулевым системным шумом

ная предлагаемым методом без учета системного шума, и наиболее неточны результаты, полученные с помощью частичного фильтра.

Однако отметим, что время работы как предлагаемого метода, так и метода выборки по важности резко увеличивается, т. к. в этом случае мы переходим от четырехкратных интегралов к 34-кратным. Можно выдвинуть тезис о целесообразности пренебрежения малыми системными шумами, т. к. выигрыш по времени в этом случае будет очень большой (см. табл. 2), а проигрыш в точности невелик (рис. 6). Наконец, отметим, что при больших системных шумах (составляющих порядка 10 % от характерной скорости) преимущество предлагаемого метода над классическим методом important sampling теряется, а замена решения задачи с системным шумом на решение задачи при его отсутствии приводит к существенным неточностям.

В статье предложен новый, эффективный метод выбора плотности распределения узлов случайной сетки для вычисления байесовской оценки для задачи о слежении по азимуту. Он основан на рациональном выборе плотности распределения точек для генерации случайной сетки методом Монте-Карло. Выбирается плотность, которая более близка к оптимальной плотности, чем априорная плотность распределения вектора состояния, и в то же время доступна для эффективного моделирования.

В условии малости системных шумов предлагаемый метод значительно выигрывает в сравнении с двумя признанными стандартными методами байесовского оценивания. Изложена сущность метода, представлены результаты численных экспериментов, отмечены некоторые перспективные возможности совершенствования предложенного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арсеньев, Д.Г.** Адаптивное управление в стохастических методах вычислительной математики и механики [Текст] / Д.Г. Арсеньев, В.М. Иванов, М.Л. Кореневский; 2-е изд., испр. и доп. − СПб.:Наука, 2008. −423 с.

2. **Арсеньев, Д.Г.** Навигация по расстояниям до точечных ориентиров адаптивным методом существенной выборки. [Текст] / Д.Г. Арсеньев, В.М. Иванов, Н.А. Берковский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2011. –№ 1 (115). –С. 81–86.

3. **Степанов, О.А.** Введение в теорию оценивания. [Текст] / О.А. Степанов // Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации: Ч. 1. –СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. –496 с.

4. **Stepanov, O.A.** Investigation of Linear Optimal Estimator [Text] / O.A. Stepanov, A.B. Toropov // Proc. of 17-th World Congress. –Seoul, July 6–11. –P. 2750–2755.

5. **Doucet, A.** Sequentiual Monte-Carlo methods in practice [Text] / A. Doucet, N. Freitas, N. Gordon. − N.Y.: Shpringer-Verlag, 2001. –581 p.

6. **Gordon, N.J.** Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation [Text] / N.J.Gordon, D.J. Salmond // IEE Proc. –Apr. 1993. –Vol. 140. –№ 2. –P. 107−113.

7. **Geweke, J.** Bayesian inference in econometric models using Monte-Carlo integration [Text] / J. Geweke // Econometrica. –Nov. 1989. –Vol. 57. –№ 6. –P.1317–1339.

8. **Kostas E. Bekris.** Evaluation of Algorithms for Bearing-Only SLAM// [Электронный ресурс] / Kostas E. Bekris, Max Glick, L.E. Kavraki. –2006. –Режим доступа: http://www.cse.unr.edu/~bekris/papers/bearing_only_slam.pdf

УДК 681.3.06

Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Т.А. Карташева

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ИНВЕСТИЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Актуальность проблемы управления инвестиционным процессом на макроэкономическом уровне обусловлена как потребностями современной экономической науки, так и сложностями, возникающими в практике реализации государственных программ регулирования экономики.

Современные условия экономического развития, характеризующиеся усложнением производства, обострением конкуренции, усилением общей нестабильности экономического положения, возрастанием неопределенности условий реализации инвестиционных проектов требуют проведения исследований механизмов управления процессами функционирования макроэкономической системы (МЭС), в т. ч. и инвестиционными процессами [1, 2].

Один из путей решения проблемы – разработка модельных и программных комплексов, предназначенных для поддержки принятия решений при управлении инвестиционным процессом на макроуровне на основе технологий искусственного интеллекта и имитационного моделирования [3]. Для обеспечения поддержки процедур анализа инвестиционных процессов МЭС ведется разработка системы имитационного моделирования и интеллектуального управления (СИМИУ) МЭС в неравновесных рыночных условиях, которая включает подсистемы имитационного моделирования, аналитической поддержки и интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении инвестиционным процессом МЭС [4–6].

В статье рассматриваются вопросы построения третьей подсистемы, связанные с разработкой интеллектуальных алгоритмов принятия решений при управлении инвестиционным процессом МЭС в условиях неопределенности рыночной среды. Разработка интеллектуальных алгоритмов ведется в классе продукционных моделей с применением нейросетевых технологий и технологий инженерии знаний на основе предложенного метода формирования интеллектуальных алгоритмов управления МЭС [6].

Процедура разработки интеллектуальных алгоритмов принятия решений предполагает последовательное решение двух задач: задачи *классификации* неравновесных макроэкономических ситуаций (этап 1) и задачи *формирования правил принятия решений* для выделенных классов ситуаций (этап 2). В результате решения этих задач формируются интеллектуальные алгоритмы принятия решений, представленные в виде нейросетевых алгоритмов классификации макроэкономических ситуаций и продукционных правил принятия решений при управлении инвестиционным процессом МЭС.

Решение названных задач поддержки принятия решений основано на следующих положениях, обусловленных особенностями динамической модели МЭС [4, 5].

1. Под инвестиционным процессом МЭС понимают повторяющиеся во времени процессы формирования сбережений из нераспределенной прибыли фирм и доходов населения и государства; их перераспределения через банковскую систему, рынок ценных бумаг и государственный финансовый механизм; а также процессы вложения накопленных средств (формирования инвестиционных потоков) в различные объекты хозяйствования и процессы формирования прибыли. Перечисленные процессы образуют инвестиционный цикл, входящий в состав воспроизводственного цикла МЭС в условиях рыночных отношений [3–7].

2. Процесс инвестирования, рассматриваемый на макроэкономическом уровне, сопровождается формированием инвестиционного потока $\dot{I}b$ (инвестиционного спроса), являющегося компонентом совокупного спроса $\dot{A}d$ и складывающегося из инвестиционных расходов реального сектора $\dot{I}b_1$ и банковского сектора экономики $\dot{I}$.

3. Инвестиционный спрос $\dot{I}b$ формируется в условиях рыночных отношений в результате взаимодействия всех секторов макроэкономической системы на макроэкономических рынках благ и денег, взаимосвязанных друг с другом по финансовых потокам с учетом информационных регулирующих факторов рыночной среды в виде уровня цен P и процентной ставки r [5].

На этапе 1 для решения задачи классификации макроэкономических ситуаций применяются нейросетевые методы, что обусловлено рядом причин. Во-первых, сложностью формирования зависимостей при классификации ситуаций в динамике на основе многопараметрического анализа множества признаков, характеризующих инвестиционный процесс МЭС в условиях рыночных отношений. Во-вторых, наличием динамической модели МЭС как средства для генерации новых знаний, извлечение которых происходит путем многократного проведения имитационных экспериментов. В-третьих, ограниченными возможностями аналитика, который наблюдает за изменением во времени большого количества переменных состояния МЭС как динамическо-

го объекта управления (ДОУ) при проведении имитационного эксперимента и при этом должен провести значительное количество экспериментов, в результате которых формируется база экспериментальных данных. Эти данные служат источником для извлечения закономерностей типа «классификация» на основе методов интеллектуального анализа данных.

Наиболее предпочтительным из всех методов интеллектуального анализа данных являются нейронные сети Кохонена, позволяющие объединять в группы (кластеры) наиболее сходные по многим признакам (переменным состояния) объекты (ситуации) и визуализировать их с помощью самоорганизующихся карт (СОК) [6, 8].

Для выполнения нейросетевой кластеризации сформировано множество анализируемых признаков $X = \{x_j\}$, $j = 1..m$, включающее элементы вектора управляемых координат Y, вектора внешних воздействий F и вектора управляющих координат U, составляющих описание инвестиционного процесса МЭС как ДОУ [4, 5]. Поскольку количество признаков достаточно большое (более сорока), то целесообразно предварительно структурировать их по степени общности описания неравновесных макроэкономических ситуаций. Результатом структурирования является двухуровневое дерево признаков.

Корень дерева (верхний уровень) соответствует одному множеству макроэкономических ситуаций, которые описываются признаками, характеризующими состояние рынка благ как интегрирующей подсистемы МЭС [1, 2]. Эти признаки представляют наиболее обобщенное описание состояния МЭС и включают: темп выпуска валового внутреннего продукта (ВВП) $\dot{Y}$, совокупные расходы $\dot{Y}_{\exp}$, уровень цен P; все компоненты совокупного спроса, в т. ч. и инвестиционного спроса $\dot{I}b$. Для выполнения кластеризации макроэкономических ситуаций на верхнем уровне разрабатывается одна нейронная сеть $НС_1$, кластеры выделяются в зависимости от направления и степени изменения основных макроэкономических показателей, определяющих либо экономический рост, либо спад. Правила принятия решений для построенных кластеров не формируются, поскольку не определены причины выявленных тенденций экономической динамики.

Нижний уровень представлен четырьмя вершинами, соответствующими четырем множествам макроэкономических ситуаций, возникающим на рынке благ и выделенным в зависимости от характера изменения совокупного спроса $\dot{A}d$ и совокупного предложения $\dot{A}s$. По каждой из четырех множеств ситуаций производится самостоятельная кластеризация с целью выявления причин возникновения этих ситуаций.

Для кластеризации ситуаций в каждом q-м множестве ситуаций из четырех выделенных ($q = 1 \div 4$) разрабатываются самостоятельные нейронные сети $НС_2^q$, $q = 1 \div 4$. Для построения каждой $НС_2^q$ составляется план проведения n_q экспериментов, определяются множества $T_q = \{t_{qk}\}$ анализируемых моментов времени, проводятся эксперименты по неуправляемым сценариям функционирования МЭС, создаются файлы базы экспериментальных данных (БЭД). Для каждого построенного кластера формируются правила принятия решений с учетом выявленных причин возникновения неблагоприятных ситуаций.

Последовательность кластеризации макроэкономических ситуаций соответствует нисходящему движению по уровням иерархии.

На этапе 2 для решения задачи формирования правил принятия решений при управлении инвестиционным процессом МЭС привлекаются знания эксперта, оценочные суждения которого позволяют составить множество продукционных правил, учитывающих результаты кластеризации ситуаций, выполненной на предыдущем этапе. Предложена структура продукционного правила, согласно которой антецедент включает переменные, определяющие номер кластера макроэкономических ситуаций, характеризующий причину возникновения выявленной неблагоприятной ситуации, и запасы ресурсов секторов экономики; а консеквент содержит рекомендуемые решения, определяющие направление и величину изменения управляющих координат вектора U.

Далее рассматривается пример формирования интеллектуальных алгоритмов принятия решений при управлении инвестиционным процессом МЭС путем принятия решений $U_m(t)$ в области кредитно-денежной политики. Вектор $U_m(t)$ представлен в виде $U_m(t) = \{\Delta r^0(t),\ \Delta MS(t),\ \Delta\dot{I}_a,\ \Delta\dot{I}b_1^0\}$, где $\Delta r^0(t)$ – корректировка ставки рефинансирования центральным банком, проводимая в рамках

Неценовые факторы совокупных инвестиционных расходов

Неценовые факторы совокупных инвестиционных расходов *Ib*	Тип переменной	Наименование переменной	Модель, в которой формируется переменная	Характер зависимости
Ожидания инвесторов (фирм), связанные с внутренней нормой отдачи	Экзогенная	$\Delta\dot{I}b_1^0$ $\Delta\dot{I}_a$	Реальный сектор, сектор финансовых учреждений	+ +
Ставка процента	Эндогенная	r	Рынок денег, *U*	–
Текущий доход	Эндогенная	$\dot{Y}_{\exp}$	Реальный сектор	+
Налоги на производство и импорт	Эндогенная	$\dot{T}p$	Реальный сектор, *U*	–
Трансферты	Эндогенная	$\dot{T}r_1$	Реальный сектор, *U*	+
Технологии	Экзогенная	$\Delta\dot{I}b_1^0$	Реальный сектор	+
Масса денег (предложение денег)	Экзогенная	ΔMS	Рынок денег, *U*	+

учетной политики; $\Delta MS(t)$ – корректировка количества денег в экономике центральным банком путем проведения операций на открытом рынке ценных бумаг или изменения нормы минимального резервного покрытия; $\Delta\dot{I}_a$, $\Delta\dot{I}b_1^0$ – корректировки темпов формирования инвестиций сектором финансовых учреждений и реальным сектором соответственно вследствие принятия мер по улучшению инвестиционного климата [5].

Изменение количества денег на величину $\Delta MS(t)$ необходимо приводить к двум видам корректировок в модели: во-первых, к изменению предложения денег $\Delta MS(t)$ как информационного сигнала, учитываемого при формировании ставки процента на рынке денег; и, во-вторых, к изменению запасов $\Delta St_3(t)$ финансового сектора и $\Delta St_4(t)$ сектора государственных учреждений [5].

Для этапа 1 предложенной процедуры формирования интеллектуальных алгоритмов представлен пример разработки двух нейронных сетей: $НС_1$ верхнего уровня и $НС_2^3$ (q = 3) нижнего уровня, предназначенной для дополнительной кластеризации неравновесных ситуаций рецессии группы 3, обусловленных снижением совокупного спроса. Именно эта группа ситуаций является самой многочисленной по различным вариантам рецессии, которые связаны с изменениями в поведении всех секторов МЭС и требуют формирования отдельных множеств рекомендуемых решений либо по кредитно-денежной, либо по бюджетно-налоговой политикам, либо по их сочетанию.

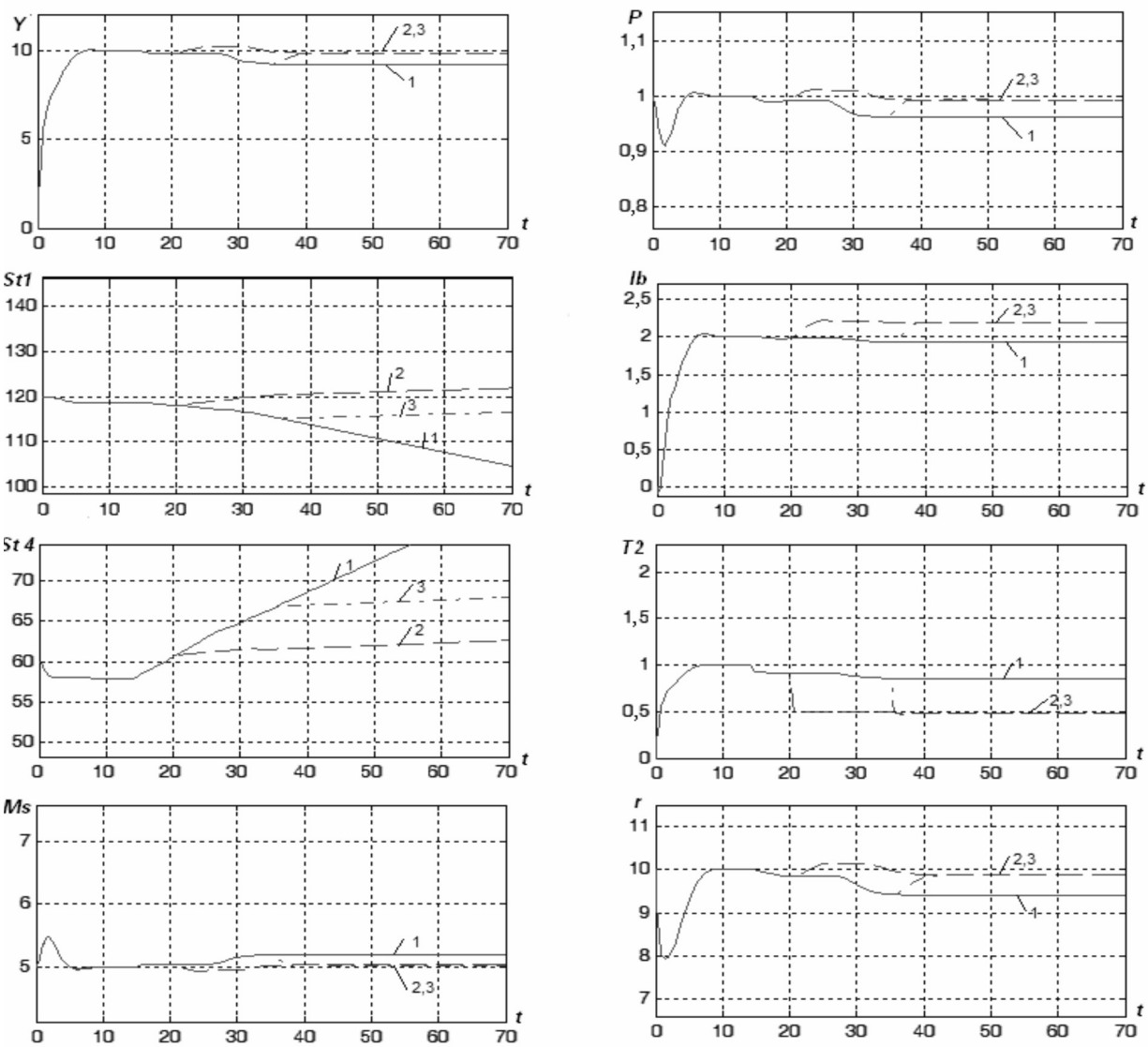
Для построения первой нейронной сети $НС_1$ сформирован вектор входных признаков: $X_{HC_1} = \{\dot{A}s, \dot{A}d, \dot{Y}_{\exp}, \dot{R}ev, P, \dot{I}b, \dot{G}, Md, Ms\}$, где $\dot{A}s$, $\dot{A}d$, $\dot{Y}_{\exp}$, $\dot{R}ev$, $\dot{I}b$, $\dot{G}$ – фактические темпы формирования совокупного предложения, совокупного спроса, ВВП по расходам, доходов реального сектора, инвестиционного спроса и госзакупок соответственно; *P* – текущий уровень цен; *Md* – спрос на деньги; *Ms* – предложение денег.

Построены восемь кластеров неравновесных экономических ситуаций, различающихся соотношениями компонентов совокупного спроса и совокупного предложения, а также тенденциями их изменения. Построенные кластеры за исключением кластера ситуаций, близких к плановым, объединены в четыре зоны. Первая зона включает в себя макроэкономические ситуации подъема экономики и представлена тремя кластерами, различающимися по видам политик стимулирования роста ВВП. Вторая зона включает в себя макроэкономические ситуации, вызванные снижением совокупного предложения, и представлена двумя кластерами, различающимися по степени снижения темпов выпуска ВВП. Третья зона включает в себя макроэкономические ситуации, вызванные

падением совокупного спроса, и представлена двумя кластерами, различающимися по степени снижения совокупного спроса. Четвертая зона содержит ситуации долгосрочного экономического роста. Правила принятия решений для этого уровня не формируются.

Для построения $НС_2^3$ составлен план проведения n_3 экспериментов, определены множества $T_3 = \{t_{3k}\}$ анализируемых моментов времени, проведены эксперименты, созданы файлы БЭД. В таблице представлен перечень неценовых факторов, служащих возможными причинами возникновения изменений инвестиционного спроса $\dot{I}b$ как компонента совокупного спроса $\dot{A}d$. Для рассматриваемых ситуаций характерным является низкий уровень ВВП $\dot{Y}_{\exp}$, совокупного спроса $\dot{A}d$; незначительное снижение уровня цен *P*, вызванное снижением компонент совокупного спроса, а также рост реального предложения денег *Ms*. Эта группа ситуаций незначительно отличается от плановых, и именно поэтому требуется своевременное принятие решений, которые и должны возвратить МЭС на желаемую траекторию движения.

Вектор входных признаков для нейронной сети $НС_2^3$ представлен в виде $X_2^3 = \{\dot{F}l_1, \dot{T}p, \dot{F}l_2, \dot{T}_2, \dot{C}, \dot{F}l_3, \dot{I}, \dot{F}l_4, \dot{G}, r\}$, где $\dot{F}l_i$, $i = \overline{1,4}$ – темп формирования сальдо потоков *i*-го



Графики результатов экспериментов
1 (——) – эксперимент без управления; 2 (– – –) и 3(– · – · –) – эксперименты с управлением

сектора; $\dot{T}p, \dot{T}_2, \dot{C}, \dot{I}, \dot{G}$ – темпы формирования налогов на производство и импорт, подоходных налогов, потребления, инвестиций и госзакупок соответственно. Построено шесть кластеров, что объясняется количеством типов причин рецессии, вызванной падением совокупного спроса.

На этапе 2 предложенной процедуры формирования интеллектуальных алгоритмов выполняется анализ построенных СОК для ситуаций снижения совокупного спроса и формулируются правила принятия решений. В качестве примера приведены правила принятия решений в области денежно-кредитной политики при управлении инвестиционным процессом МЭС.

Правило для кластера 5_2^3 имеет вид:

ЕСЛИ кластер = 5_2^3 И $St_2 = M$ И $St_3 = D$,

ТО Решение = $Dec_m\,(Ms)$,

где кластер 5_2^3 объединяет ситуации, связанные с колебаниями спроса на ценные бумаги и вызванные информационными сигналами, свидетельствующими об увеличении риска по ценным бумагам. Принимаемые решения связаны с мерами денежно-кредитной политики для создания благоприятного инвестиционного климата и заключаются в увеличении предложения денег $Dec_m^I(Ms)$ или снижении ставки процента $Dec_m^D(r)$. Обозначения множества решений предполагают, что в скобках указан изменяемый фактор, на который оказывается воздействие; нижний индекс указывает характер политики (m – монетарная, т. е. денежно-кредитная); верхний – соответствует значению изменяемого фактора (M – поддержание планового режима, IF – небольшое увеличение, I – увеличение, D – уменьшение).

Правило для кластера 2_2^3 имеет вид:

ЕСЛИ кластер = 2_2^3 И $St_3 = M$ И $St_4 = I$,

ТО Решение = $Dec_m^{IF}(Ms)$,

где кластер 2_2^3 включает неблагоприятные ситуации, связанные с особенностями инвестиционного климата и обусловленные негативными ожиданиями инвесторов и предположениями об их относительно низкой предельной эффективности капитала [1, 2]. Возмущения, внесенные в контур «инвестиции-сбережения», не могут не затронуть и основной контур «производство-потребление». Решения должны быть связаны с мерами денежно-кредитной политики для создания благоприятного инвестиционного климата $Dec_m^{IF}(Ms)$, $Dec_m^{DF}(r)$ или $Dec_m^I(\dot{I}b_1^0)$. Выбор путей проведения монетарной политики может быть сделан в пользу политики дешевых денег, которая, однако, имеет опасность столкнуться с ликвидной ловушкой [1, 2].

Все этапы процедуры формирования интеллектуальных алгоритмов принятия решений выполняются в единой информационной среде СИМИУ инвестиционным процессом МЭС, интегрированной с приложением Simulink среды MATLAB, платформой Deductor и средой Resolver [3].

Проведены экспериментальные исследования эффективности применения мер денежно-кредитной политики с дополнительным воздействием мер бюджетно-налоговой политики (см. рис.). В первом (неуправляемом) сценарии моделируется неравновесная ситуация, характеризующаяся низким уровнем государственных расходов. Сектор государственных учреждений функционирует на неравновесном режиме накопления запасов St_4 в различных фондах. Развивается рецессия, вызванная снижением совокупного спроса. Рынок благ реагирует снижением цен и последующим снижением совокупного предложения и выпуска ВВП (первая волна рецессии, $t = 15$). Как следствие, падают доходы населения, но потребление некоторое время сохраняется на прежнем уровне за счет ранее накопленных запасов. Снижаются и инвестиционные расходы фирм. Вторая волна рецессии ($t = 30$) вызвана падением как инвестиционного, так и потребительского спроса, произошедшим вследствие длительного снижения запасов реального сектора и сектора домохозяйств. Темп выпуска ВВП $\dot{Y}$ существенно снижается, затрагивая все контуры воспроизводственного процесса, в т. ч. и инвестиционного процесса, вызывая ухудшение положения всех секторов. Рынок денег реагирует на снижение ВВП падением процентной ставки r вследствие снижения спроса на деньги в ситуации экономического спада.

Для преодоления сложившейся ситуации во втором эксперименте (управляемом) реализуются меры в области денежно-кредитной политики (решения для кластера 2_2^3 из множества $Dec_m^I(\dot{I}b_1^0)$) с целью улучшения инвестиционного климата (реальный сектор увеличивает инвестиционные расходы $\Delta\dot{I}b_1 = 0,2$). Дополнительные решения

принимаются по увеличению государственных расходов ($\Delta\dot{G} = 0,4$, t = 20) как на инвестиционные цели, так и на цели поддержки населения. Проводится политика снижения налогового бремени (меры бюджетно-налоговой политики), которые должны стимулировать также и инвестиционную активность реального сектора экономики. Перечисленный комплекс мер государственного регулирования обеспечивает компенсацию падения темпов выпуска ВВП в 1,12 раза. Кроме того, за счет своевременной корректировки потоков расходов секторов экономики предотвращено нерациональное перераспределение запасов секторов МЭС.

Третий эксперимент отражает значимость времени принятия решения. Если те же самые управляющие воздействия принять с запозданием, например, в момент времени t = 35, то перераспределение запасов между секторами будет значительным.

Таким образом, разработаны интеллектуальные алгоритмы принятия решений при управлении инвестиционным процессом МЭС, представленные нейросетевыми алгоритмами кластеризации неравновесных макроэкономических ситуаций и продукционными правилами принятия решений в области денежно-кредитной политики. Разработаны нейронные сети Кохонена для классификации неравновесных ситуаций с учетом рыночных факторов на основе признаков различных уровней иерархии. Первая нейронная сеть выполняет классификацию ситуаций на основе обобщенной информации о состоянии МЭС с учетом характера неравновесия на рынке благ, интегрирующего все основные финансовые потоки МЭС. Вторая нейронная сеть предназначена для выявления причин, вызвавших рецессию, и служит основой для формирования правил принятия решений в области денежно-кредитной политики.

Исследованы пессимистические сценарии, продемонстрировавшие возможность эффективного управления инвестиционным процессом МЭС в условиях неопределенности за счет совместного проведения мер денежно-кредитной и налогово-бюджетной политик, реализуемых в рамках государственного регулирования.

Результаты экспериментов показали, что принимаемые решения позволяют обеспечить переход от неблагоприятных, динамически неравновесных ситуаций к более благоприятным ситуациям, соответствующим прежнему или новому уровню темпа выпуска ВВП. Показано, что эффективность управления зависит не только от направления корректировок управляющих координат и их значений, но и от времени принятия решений и их правильно выбранной последовательности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курс экономической теории: Учебник [Текст] / Под общ. ред. А.В. Сидоровича. –М.: Дело и сервис, 2008. –1040 с.

2. **Валинурова, Л.С.** Управление инвестиционной деятельностью: Учебник [Текст] / Л.С. Валинурова, О.Б. Казакова. –М.: КНОРУС, 2005. –384 с.

3. **Ильясов, Б.Г.** Интеллектуальная информационная система поддержки процедур управления воспроизводственным процессом [Текст] / Б.Г. Ильясов, Е.А. Макарова, А.Н. Павлова // Программные продукты и системы. –2010. –№ 1. –С. 88–90.

4. **Ильясов, Б.Г.** Регулирование неравновесных процессов макроэкономического кругооборота финансовых потоков [Текст] / Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, А.Н. Павлова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2010. –№ 1. –С. 120–128.

5. **Ильясов, Б.Г.** Динамическое моделирование неравновесных процессов взаимодействия рынков благ и денег [Текст] / Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Т.А. Карташева // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2011. –№ 1. –С. 87–94.

6. **Макарова, Е.А**. Метод формирования алгоритмов управления макроэкономической системой с использованием имитационных моделей [Текст] / Е.А. Макарова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№2. –С.107–114.

7. **Ильясов, Б.Г.** Моделирование неравновесных воспроизводственных процессов макроэкономической системы [Текст] / Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Э.Р. Габдуллина // Вестник УГАТУ. –2008. –Т. 11. –№ 1. –С. 74–82.

8. **Кохонен, Т**. Самоорганизующиеся карты [Текст] / Т. Кохонен; Пер. с англ.; 3-е изд. –М.:БИНОМ, 2008. – 655 с.

УДК 004.051

Е.П. Антышев, Ю.В. Тименков

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ БУФЕРИЗАЦИИ КОДА

Существует класс моделей для описания распределения ресурсов операционной системы на основе представления выполняющейся задачи в терминах «траектории исполнения»: текущему состоянию задачи ставится в соответствие точка в координатах (X, T), где X – стадия исполнения программы, а T – физическое время. Данная модель предложена А.Г. Тормасовым в 2006 г. [5] и расширена в последующих работах по данной тематике [6] и др.

Ключевым входным параметром модели [2] является *профиль использования ресурсов*: количество необходимых задаче на некотором *этапе исполнения* ресурсов, таких, как время процессора, сетевого адаптера, жесткого диска и др. Мерой потребности в процессоре здесь может выступать количество тактов на инструкцию (cycles per instruction, CPI).

В работе [2] подразумевалось, что информация об использовании ресурсов выделенным процессом будет верна и для множества одновременных процессов исполнения той же программы. Однако существует множество факторов, когда различие будет существенным. Как правило, эти факторы связаны с переполнением кеша процессора: для единственного выделенного процесса доля промахов при доступе к коду или данным минимальна, при появлении других процессов происходит взаимное вытеснение из кеша процессора, что приводит к увеличению CPI каждой задачи.

Еще одним фактором, ограничивающим использование профиля исполнения для расчета набора задач, является невозможность переноса результата на другую вычислительную машину, процессор которой имеет иное устройство конвейера, приводящее к другому CPI. То есть существует проблема применимости данных моделирования для другой машины, отличной по характеристикам от той, для которой были получены переносы данных моделирования: оборудование отличается по множеству параметров, относящимся к производительности. В частности, машина с другим чипсетом может иметь большую латентность RAM памяти, что приведет к увеличению времени работы программы при том же количестве выделенного времени процессора. Иными словами, CPI программы зависит сильным образом от оборудования.

Возникает задача использования профиля ресурсов, полученного на одной машине, для моделирования тех же задач на другой машине. Для ее решения необходимо убрать из профиля специфическую для данной машины задержку, связанную с рассматриваемой компонентой процессора (в настоящей работе это front-end).

В данной статье предпринята попытка математически описать влияние характеристик front-end процессора, а также кеша инструкций на CPI программы с целью уточнения модели распределения ресурса процессора, предложенной в [2].

Цель работы. Исследование факторов, определяющих производительность выполнения кода на типичном x86 процессоре, их количественное описание с целью уточнения модели [2]. Из широкого множества таких факторов для исследования выбраны эффекты, относящиеся к производительности front-end и кеша инструкций первого уровня.

Внутренние ресурсы процессора. В статье рассматривается процессор Intel Core как современный суперскалярный вариант имплементации архитектуры 80x86, ввиду его широкого распространения, типичности для серверного и кластерного оборудования.

Практически во всех современных микропроцессорах используется конвейер для одновременной обработки последовательных стадий выполнения потока инструкций. Наличие конвейера позволяет говорить о *ресурсах микропроцессора*: пропускной способности различных участков конвейера.

В статье выделено три таких ресурса: устройство подкачки и обработки инструкций, или front-end (instruction fetch unit, decoder, BPU), устройство исполнения микроопераций (out-of-order engine, OOO) и устройство завершения инструкций (retirement unit, ROB).

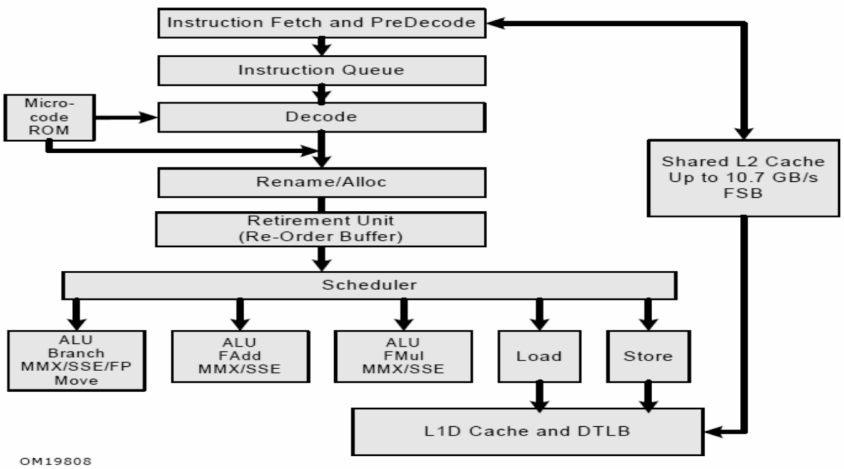


Figure 2-2. Intel Core Microarchitecture Pipeline Functionality

Рис. 1. Схема конвейера Intel Core из [3]

Необходимо отметить в сложной структуре процессора «узкие места»: устройства, производительность которых для некоторого класса программ определяет общую производительность. В качестве широкого и относительно малоизученного такого класса задач мы выбрали large code – small data разновидность задач.

Производительность таких программ при некоторых условиях ограничена front-end микропроцессора: набором устройств обработки инструкций, передающим их в виде потока микроопераций на вход суперскалярного вычислительного утройства (out-of-order execution unit) [7].

Измерение производительности front-end и OOO engine. Современные процессоры обычно имеют большой набор неархитектурных счетчиков производительности, доступных для ядра операционной системы (ring 0). Как правило, удобный интерфейс для их исследования предоставляют профилировщики, созданные производителем микропроцессора. Это, например, vtune от Intel и CodeAnalyst для AMD. В данной статье рассматривается процессор Intel Core 2 Duo и используются соответствующие наименования счетчиков.

Промах кеша инструкций без перехода. Самый непосредственный способ вызвать промах кеша инструкций – организовать цикл, тело которого имеет размер больше размера кеша. Например, в рассматриваемом случае цикл имел вид, представленный в листинге 1.

```
        mov ebx, $exit - <codesize>
        jmp ebx
$start:
        dec eax
        dec eax
        dec eax
        …
        jl $exit
        jmp ebx
$exit:
```

Листинг 1: Цикл с регулируемым размером кода

В конце цикла проверяется значение EAX. Если оно отрицательное, то происходит выход из цикла. То есть количество выполненных инструкций будет равным начальному значению EAX с точностью до размеров тела цикла (на x86 код «dec eax» 1 байт). При значении EAX = 2e9 и размере цикла 100 Кбайт погрешность 0,02 %.

Эксперимент показал, что количество промахов подчиняется очевидной формуле:

$$L1I_MISSES = \\ = Pmiss \times INST_RETIRED.ANY \quad (1)$$

Иными словами, количество промаха есть вероятность вытеснения инструкции из кеша L1, умноженная на число инструкций. При механизме вытеснения pseudo-LRU, применяемом в кеше L1I Intel Core [3], каждая сто двадцать восьмая (64 байта – размер линии кеша, еще 64 байта – prefetch stride [3, § 7.7.3.3]) инструкция оказывается вытесненной, если размер кода цикла превышает S(L1) = 32 Кб – размер кеша инструкций L1. То есть в нашем эксперименте Pmiss = 1/128.

Однако возрастание L1I_MISSES не сказывается на производительности: о промахе кеша становится известно на этапе instruction fetch до выполнения инструкции.

Пропускная способность IFU на Intel Core 2 составляет 16 байтов на такт: в нашем случае, когда размер инструкции 1 байт, это дало бы 16 инструкций в такт. Производительность front-end в целом определяется скоростью декодирования коротких инструкций: четыре микрооперации в такт (подробнее см. [3, § 2.2.2.4]). «dec eax» составляет одну микрооперацию (поэтому RS_UOPS_DISPATCHED = INST_RETIRED. ANY), следовательно front-end обрабатывает не более четырех инструкций в такт.

Производительность out-of-order engine составляет одну микрооперацию в такт: последовательность «dec eax» является информационно-зависимой, что не позволяет использовать более одного ALU.

Следовательно, производительность конвейера в целом для нашей программы определяется скоростью выполнения микроопераций в одном ALU и равна одной инструкции в такт (что подтверждается опытом, исходя из счетчика RESOURCE_STALLS.RS_FULL – числа тактов, в которые reservation station не смогла принять новых микроопераций от front-end ввиду их медленного выполнения). Наличие промахов L1, предсказанных на ранней стадии конвейера, на производительность не влияет, что и является основным результатом этого эксперимента:

$$CLK = CLK0 + K * L1_MISSES * L1_miss_cost \quad (2)$$

Здесь выражено ухудшение производительности в зависимости от числа промахов кеша инструкций L1I_MISSES; K – коэффициент «непредсказуемости» перехода (K = 0 в данном случае); L1_miss_cost – стоимость промаха кеша инструкций с попаданием в кеш L2.

Следовательно, промахи кеша инструкций не являются достаточным условием для ухудшения производительности, если о них становится известно на ранних стадиях конвейера, как в рассмотренном случае.

Прямые переходы. Для исследования влияния прямых переходов (direct jumps) на производительность сгенерирована тестовая программа, содержащая большое количество относительных переходов на одинаковый сдвиг. В листинге 2 приведен участок программы:

```
unitN: dec eax
jz $exit
mov ecx, unitN + 64
cmp ecx, ebx
jae $start
jmp unitN + 64
ALIGN 16
unitN+1:
…
```

Листинг 2: Прямые переходы в ограниченном адресном пространстве (от unit0 до ebx, с шагом 64 байта)

Сгенерирован код, состоящий из подобных идентичных блоков. Регистр EAX играет роль счетчика переходов, регистр EBX содержит адрес-ограничитель: если следующий переход произойдет на адреса ниже (больше) ограничителя, произойдет возврат в начало кода (метка $start). Таким образом, каждый переход на длину не менее 64 байтов на вытесненный из кеша адрес, вызывает обращение к кешу L2. В нашем случае каждый следующий переход вызывает промах кеша при размере цикла более 32 Кбайтов.

Исследованы следующие значения сдвига: 4096 байт, 512 байт, 256 байт, 128 байт, 64 байта, 32 байта. На рис. 2 приведены графики зависимостей времени выполнения программы (CLK_CPU_UNHALTED.CORE) от размера кода, в котором локализованы переходы, при одинаковом общем числе выполненных инструкций.

Во всех случаях наблюдается скачок при размере кода в 32 Кбайта: в этой точке происходит резкое ухудшение благодаря тому, что код перестает помещаться в кеш L1. В отличие от эксперимента со случайными переходами, где наблюдается плавное возрастание количества промахов L1 (и задержек front-end) от размера кода, здесь изменение скачкообразное.

Ключ к пониманию этой особенности – ограниченная ассоциативность кеша L1. Напомним, что кеш L1 инструкций на Intel Core имеет восемь направлений по 4 Кбайта, механизм вытеснения (псевдо) LRU. Пусть сдвиг переходов равен 4096 байт. В 8-way кеше существует восемь линий, способных содержать адреса с одинаковым смещением в 4 Кбайта странице. Если общее количество адресов переходов в программе не больше восьми, весь код через несколько промахов оказывается в кеше. Однако если количество пере-

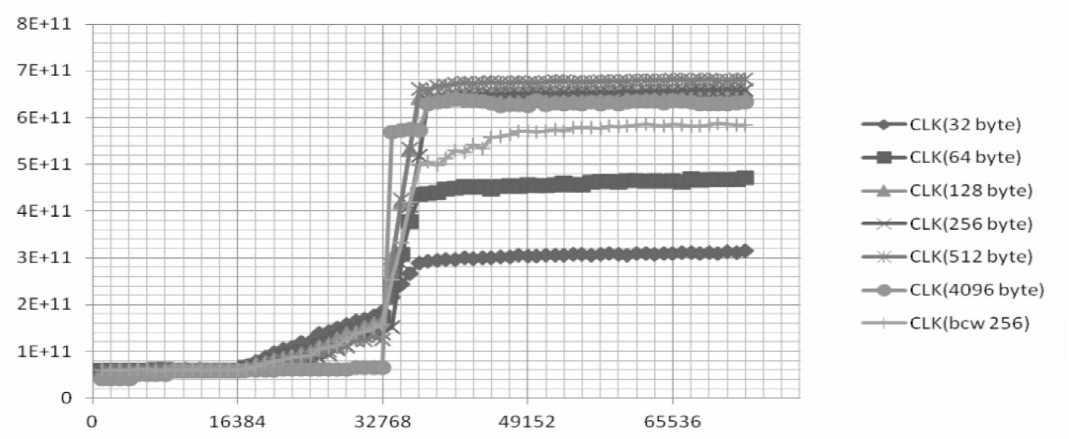


Рис. 2. CLK_CPU_UNHALTED.CORE от размера кода в цикле (прямые переходы)

ходов больше восьми, каждый очередной переход вызывает промах L1, в результате которого сам оказывается в кеше, но следующий переход в свою очередь вызывает промах и т. д. Таким образом, когда размер кода, в котором производятся переходы, превышает 8 * 4096 байт = 32 Кбайта (размер кеша L1), происходит резкое понижение производительности front-end.

Количественно изменение производительности выражается через время задержки на доступ к кешу L2: 23–24 такта задержки на один промах L1. Это значительно больше, чем документированная задержка в 10 тактов на промах L2, которую можно найти в [3]. Предположительно, 24 такта являются суммой 10 тактов задержки на доступ к L2 и 14 тактов на прохождение конвейера [1]:

$$L1_miss_cost = L2_lat + Pipe_length. \quad (3)$$

Итак, влияние прямых переходов на общую производительность без учета указанных особенностей пропорционально количеству переходов, вызывающих промах кеша (спекулятивно определяется по пути выполнения из листинга программы) и суммарной латентностью кеша L2 и временем прохождения конвейера, в данном эксперименте равной 24 тактам:

$$CLK = CLK0 + Pmiss * BR_INST_EXEC * *(L2_lat + Pipe_length). \quad (4)$$

Косвенные переходы. Косвенные переходы представляют особую сложность для устройства BPU ввиду того, что адрес перехода неизвестен до завершения исполнения инструкции перехода. В современных процессорах используются достаточно сложные и недокументированные механизмы предсказания адресов переходов [4].

Некоторые разновидности косвенных переходов могут быть хорошо предсказаны. Адреса возврата ret инструкций практически всегда могут быть получены из стека адресов возврата, который поддерживается в BPU Intel Core 2 [1, § 2.2.2.1].

Тестовая программа, позволяющая узнать задержку на сброс конвейера и обращение к кешу L2, возникшую вследствие неугаданного косвенного перехода, приведена в листинге 3:

```
mov eax, ecx  /*eax = ecx(random seed)*/
xor edx, edx
mov edi, 1664525
mul edi
xor edx, edx
add eax, 1013904223  /* eax <-- next random */
mov ecx, eax  /* ecx - store random seed */
div ebx
mov eax, edx  /* eax %= ebx(CODESIZE) */
and eax, 0xffffffc0  /* eax = (eax / UNITSIZE)*UNITSIZE */
dec esi  /* decrease ops counter */
jz $exit
mov edx, $start  /* edx = $start */
add edx, eax  /*edx += random offset */
jmp edx  /* jump to random unit */
ud2  /* tell processor not to decode fall-through path */
ALIGN 16
int 3
ALIGN 16
```

Листинг 3: Переходы на вычисляемый псевдослучайный адрес

Указанный фрагмент кода составляет 64 байта на x86 архитектуре. С помощью препроцессора сгенерирована программа размером 64 Кбайта,

состоящая из подобных повторяющихся фрагментов.

Каждый фрагмент вычисляет псевдослучайный адрес возврата, сохраняя сдвиг генератора в регистре EAX. Использован линейный конгруентный метод $X_{n+1} = (a * X_n + c) \bmod m$ с параметрами a = 1664525, c = 1013904223, $m = 2^{32}$ (из Numerical Recipes [8]). Адрес очередного перехода лежит в диапазоне от начала кода $start до EBX – параметр, определяющий границу переходов. В регистре ESI содержится счетчик сделанных переходов, начальное значение 2E09.

При случайной генерации адресов переходов BPU оказывается неспособным их предсказать, что приводит к сильному влиянию локальности кода на производительность: появляются непредсказуемые переходы, сопровождающиеся промахами кеша инструкций. Исходя из случайности переходов, для вероятности промаха очередного перехода можем записать:

$$\mathrm{Pmiss} = \mathrm{MAX}(0, (\mathrm{codesize} - \mathrm{L1I_size}) / / \mathrm{codesize}). \quad (5)$$

Формула (1) теперь может быть расширена подстановкой $\mathrm{L1I_MISSES} = \mathrm{Pmiss} * \mathrm{INST_RETIRED}$:

$$\mathrm{CLK} = \mathrm{CLK0} + \mathrm{K} * \mathrm{Pmiss} * * \mathrm{INST_RETIRED} * (\mathrm{L2_lat} + \mathrm{Pipe_length}). \quad (6)$$

Для приведенной программы численные значения следующие: CLKO = 2.15E11 (CPU_CLK_UNHALTED.CORE при размере кода менее 32 Кбайта), L2_lat = 10 тактов, Pipe_length = 14 тактов, INST_RETIRED = 2.0E10.

На рис. 3 представлено сравнение расчетов с экспериментальными результатами.

Пересчет профилей ресурсов [2]. Для учета задержек front-end во время измерения потребности в CPU помимо CLK_CPU_UNHALTED.CORE (полное количество тактов) следует снимать также значения счетчиков: UOPS_DISPATCHED.CYCLES_ANY – число тактов работы вычислительного устройства, дополнительное к нему UOPS_DISPATCHED.CYCLES_NONE; L1I_MISSES – количество промахов кеша инструкций; INST_RETIRED.ANY – количество инструкций.

Из этих данных можно извлечь следующую информацию об участке программы: $\mathrm{CLK_EXEC} = \mathrm{UOPS_DISPATCHED.CYCLES_ANY}$ – количество «чистых» тактов, необходимых для исполнения; зависимость $\mathrm{Pmiss}(\mathrm{L1I_size}, \mathrm{L1I_ways})$ – вероятность генерации промаха очередной инструкцией; $\mathrm{K} = \mathrm{CLK_STALL_1} / \mathrm{L1I_MISSES_1} / (\mathrm{L2_lat_1} + + \mathrm{Pipe_length_1})$ – коэффициент «непредсказуемости» промахов.

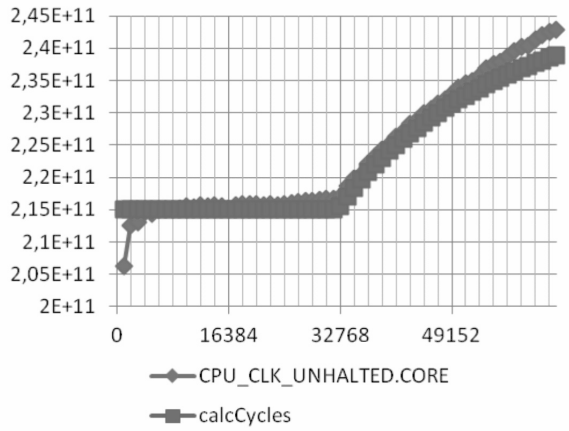


Рис. 3. Сравнение экспериментального и расчетного времени выполнения программы, индуцирующей непредсказуемые косвенные переходы в зависимости от локальности кода

Грубый пересчет производительности программы для другого процессора состоит в нахождении вероятности промаха в зависимости от новых значений размера и ассоциативности кеша инструкций $\mathrm{Pmiss_2} = \mathrm{Pmiss}(\mathrm{L1I_size_2}, \mathrm{L1I_ways_2})$; по известным K и $\mathrm{Pmiss_2}$ вычисляем новое время задержки $\mathrm{CLK_STALL_2} = \mathrm{K} * \mathrm{Pmiss_2} * \mathrm{INST_RETIRED} * * (\mathrm{L2_lat_2} + \mathrm{Pipe_length_2})$; и, наконец, прибавляем время задержки к CKL_EXEC, получая оценку для времени исполнения $\mathrm{CLK_2} = \mathrm{CLK_EXEC} + \mathrm{CLK_STALL_2}$.

Выполнено исследование влияния параметров кеша инструкций и front-end на производительность. Основным результатом служит формула (6), описывающая влияние латентости кеша L2, длины конвейера, параметров кеша L1I, разновидности перехода на производительность.

В эксперименте 1 наблюдалось отсутствие задержек при существенном числе промахов. В наших терминах это означает K' = 0 – о промахе было известно на ранней стадии конвейера.

В эксперименте 3 к задержкам приводило наличие непредсказуемых косвенных переходов. То

есть K = 1 – о промахе известно на этапе retirement, в конце конвейера.

В эксперименте 2 рассматривался смешанный случай, демонстрирующий взаимосвязь компонент конвейера. Очень большое количество вполне предсказуемых прямых переходов привело к задержкам front-end, т. к. количество логических инструкций между переходами было недостаточным, чтобы «скрыть» фоновую загрузку инструкций, вызванную промахом. Промахи здесь являлись следствием ограниченной ассоциативности кеша инструкций, и связанные с ними задержки составили около 90 % времени исполнения.

Формула [6] используется в предложенной методике пересчета затрат на исполнение задачи на другом процессоре. Эксперименты показали, что ошибка от неучета данных эффектов может составлять до 90 % процессорного времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Антышев, Е.П.** Моделирование распределения ресурсов процессора с помощью уравнений переноса [Текст] / Е.П. Антышев // Тр. 52 науч. конф. МФТИ Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Ч. VII. Управление и прикладная математика; Т. 3. –М.: Изд-во МФТИ, 2009. –С. 4–6.

2. **Антышев, Е.П.** Модель распределения ресурсов процессора и сетевого устройства в многозадачной операционной системе [Текст] / Е.П. Антышев // Математические методы и задачи управления: Сб. науч. тр. –М.: Изд-во МФТИ, 2011. –С. 186–197.

3. Intel® 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.intel.com/content/dam/doc/manual/64-ia-32-architectures-optimization-manual.pdf

4. **Agner, Fog.** The microarchitecture of Intel, AMD and VIA CPUs. An optimization guide for assembly programmers and compiler makers [Электронный ресурс] / Fog Agner // Режим доступа: http://www.agner.org/optimize/microarchitecture.pdf (2011-06-08)

5. **Тормасов, А.Г.** Модель потребления ресурсов вычислительной системой [Текст] / А.Г. Тормасов // Вестник НГУ. Сер. Информационные технологии. –2006. –Т. 4. –Вып. 1.

6. **Тименков, Ю.В.** Кинематическая модель исполнения процесса [Текст] / Ю.В. Тименков, Д.В. Тименкова // Математические модели и задачи управления. –2011. –С. 177–186.

7. **Press, William H.** Flannery Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing Text/ William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling [et al.]; 3rd ed. –NY: Cambridge University Press, 2007. –1256 p.

УДК 51-77

Т.П. Васильева, Б.И. Мызникова, С.В. Русаков

О ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГРАДООБРАЗОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

В данной статье представлены результаты, полученные с помощью модели клеточного автомата. Этот подход получил в последнее время достаточно широкое распространение в виду своей простоты, прозрачности и разнообразных приложений в динамическом пространственном моделировании.

Как известно [1], клеточный автомат – это дискретная динамическая система, представляющая собой совокупность одинаковых клеток, организация которой подчиняется набору правил, по которому любая клетка на каждом шаге по времени вычисляет свое новое состояние по состояниям ее близких соседей.

Моделированию процесса развития современных территориальных образований методом клеточных автоматов посвящен ряд исследований [2–4]. В [2], в отличие от классического клеточного автомата, рассмотрена его модификация, использующая динамические весовые коэффициенты, позволяющие более точно интерпретировать временные процессы в эволюции города. В [3] для планирования развития городской территории использован метод клеточного автомата в

сочетании с оптимизационным подходом, где на первом этапе рассматриваемая территория классифицирована на зоны с помощью оптимизационной модели, а затем с помощью модели клеточного автомата выполнен прогноз распределения населения в каждой зоне.

Клеточные автоматы с успехом применяются в решении задач моделирования различных наук – математики, физики, биологии, социологии, экономики и др., тем самым подтверждая возможность единого подхода к изучению социальных и естественнонаучных проблем.

Закон Ципфа: применение закона к городам РФ

Города во всем мире, несмотря на имеющиеся различия, демонстрируют общие черты, которые можно объяснить существованием единых, универсальных законов городского роста и структурной организации. Один из них – закон Ципфа, утверждающий, что существует степенная зависимость вида $f(n) \propto n^{-r}$ между численностью городского населения n и долей $f(n)$ таких городов в общем их списке, причем $r \approx 2$ [5].

Ниже показано, что данная степенная зависимость может быть получена с помощью модели клеточного автомата.

Рассмотрим распределение населения городов Российской Федерации. В таблице указана численность населения по городам РФ по данным Госкомстата на 1 января 2010 г. [6].

В таблице значения столбца, в котором указана доля городов каждой группы, рассчитаны относительно общего числа рассматриваемых городов и поселков городского типа. Средняя численность населения города для каждой группы рассчитана как отношение значения суммарного населения группы к количеству городов в группе.

Далее представим полученные данные в виде графика зависимости доли городов от численности населения в логарифмическом масштабе по обеим осям (рис. 1). Как видим на графике, представленная зависимость соответствует степенной зависимости $f(n) \propto n^{-2}$. Приближение МНК показывает, что для распределения городов РФ $r = 1{,}9$.

Теперь сравним полученные данные для РФ с уже известными распределениями численности городов других стран мира. На рис. 1 продемонстрированы графики распределения в логарифмическом масштабе по обеим осям для 100 крупнейших городов мира, 1300 административных делений Швейцарии и 10 стран Южной Европы [7]. Для наглядности на график также были добавлены прямые линии с коэффициентом наклона –2. Мы видим, что показатель r зависимо-

Группировка городов РФ по численности населения на 1 января 2010 г.

Группа городов	Население, тыс. человек	Количество городов в группе	Доля городов в данной группе	Суммарное население, тыс. человек	Средняя численность населения города группы
Мегаполисы	Свыше 10000	1	0,0004	10 563,0	10 563,0
Города-миллионники	1000–10000	10	0,0042	15 197,1	1 519,7
Крупнейшие города	500–1000	24	0,0100	15 429,6	642,9
Крупные города	250–500	38	0,0159	12 960,9	341,1
Большие города	155–250	40	0,0167	7 992,9	199,8
	100–155	51	0,0213	6 131,2	120,2
Средние города	65–100	77	0,0322	6 283,1	81,6
	50–65	80	0,0334	4 644,8	58,1
Малые города и поселки городского типа	Менее 50	2073	0,8659	24 503,0	11,820

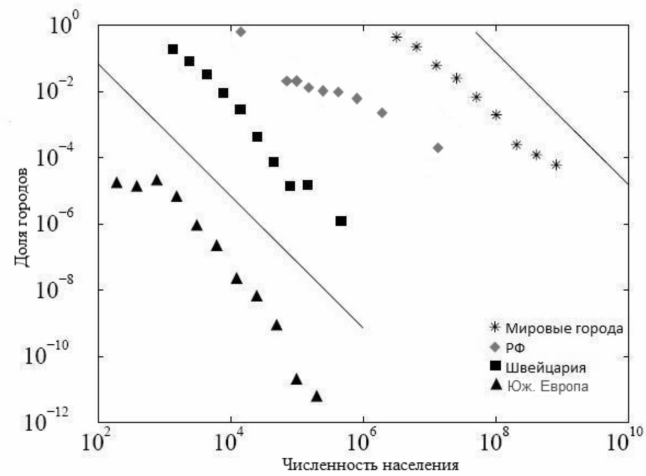


Рис. 1. Графики распределения населения городов мира, Южной Европы, Швейцарии и РФ в логарифмическом масштабе по обеим осям

сти $f(n) \propto n^{-r}$ чрезвычайно однороден $r \approx 2$. Как свидетельствуют результаты выполненного сопоставления, представленные на рисунке, данная степенная зависимость справедлива на протяжении нескольких десятилетий, несмотря на существующие различия в демографических, социальных и экономических условиях развития.

Описание модели клеточного автомата

Рассмотрим модель клеточного автомата, динамика которой строится на основе двух процессов – реакции и распространения (диффузии). Данная модель введена S.C. Manrubia и D.H. Zanette [7, 8]. Эта модель дискретна по времени и рассматривается в пространстве квадратной решетки размера $L \times L$. Каждая ячейка решетки (i, j) в момент времени t представляет собой величину населения $m(i, j, t)$. В качестве начального состояния будем рассматривать однородное распределение по всем ячейкам области, в нашем случае полагалось $m(i, j, 0) = 1$ для всех ячеек (i, j). Развитие модели состоит из двух этапов:

1. **Распространение.** Процесс распространения описывается следующим уравнением:

$$m(i,j,t+1/2) = (1-\alpha)m(i,j,t) + \\ +\frac{\alpha}{4}(m(i-1,j,t)+m(i+1,j,t)+ \\ +m(i,j-1,t)+m(i,j+1,t)), \quad (1)$$

где $0 < \alpha < 1$

Здесь на каждом временном шаге ячейка теряет часть своего содержания a, которое равномерно распределяется между четырьмя ее соседними ячейками.

Если текущая клетка находится на границе области, то соседней с ней является соответствующая клетка на противоположной стороне квадрата. Таким образом реализуется замыкание расчетной области.

Основной смысл этого процесса заключается в перераспределении населения из высоко заселенных участков в низко заселенные, тогда как на участках с умеренной численностью населения значение m остается практически неизменным.

Реакция. Далее, чтобы закончить формулировку нашей модели, к процессу распространения добавляем процесс реакции, который описывается уравнением:

$$m(i,j,t+1) = p^{-1}m(i,j,t+1/2) \\ \text{с вероятностью } p, \\ m(i,j,t+1) = 0 \\ \text{с вероятностью } (1-p), \quad (2)$$

где $t < t+1/2 < t+1$, $0 < p < 1$.

Данный процесс является обобщением модели перемежаемости, введенной Зельдовичем [9]. Зельдович доказывал появление структурности в случайных средах, указывая, что *случайность является основным механизмом возникновения структуры*. Структуры, возникающие в случайной среде, имеют своеобразный характер – вид пиков, появляющихся в случайных местах и в случайные моменты времени. Промежутки между ними характеризуются малой интенсивностью и большой протяженностью. Общее название такой картины и есть «перемежаемость».

Самопроизвольное возникновение упорядоченных структур в беспорядке кажется удивитель-

ным и необъяснимым с точки зрения термодинамики. Ответ на вопрос об уменьшении энтропии в действительности прост. Увеличение энтропии системы в целом с учетом внутренних процессов во много раз превосходит уменьшение энтропии при образовании структур. Рассматриваемый здесь подход эффекта упорядочения заключается в объяснении спонтанного порядка игрой случая в ансамбле большого числа частиц.

Простейшее представление о беспорядке связано с предположением о равновероятности всех возможных элементарных событий, которое часто оказывается чрезмерно грубым для реальной действительности. Как правило, вероятность как мера на некотором множестве элементарных событий бывает неизвестна. Это представление о беспорядке связано с гауссовским, нормальным распределением. Гауссовский беспорядок обычно обусловлен суммой действий многих слабозависимых примерно одинаковых случайных причин, как это вытекает из центральной предельной теоремы. Это распределение полностью определяется двумя неслучайными параметрами: средним значением и дисперсией. Когда распределение вероятностей случайной величины убывает на бесконечности медленнее, чем гауссовское, то высоких пиков, естественно, больше, и расположены они чаще, т. е. элемент структурности, связанный с пиками, выражен в таком поле сильнее. Подобное усиление роли пиков может быть связано с разными причинами, но наиболее очевидная состоит в том, что теперь возмущение начинает формироваться не под воздействием многих независимых сравнимых по интенсивности причин, а на первый план выступает одна из них.

Таким образом, применяя данные выводы к процессам городского формирования, получаем, что при действии событий, определяемых нами как реакции – население в достаточно большой системе сохраняет свое среднее значение, но в некоторые моменты времени величина населения начинает резко отклоняться от среднего значения. Это отклонение объясняется перемежаемостью, связанной с формированием сильной неоднородности в населении. В действительности острые пики появляются там, где накапливаются благоприятные условия для развития городов, тогда как на оставшихся участках, число которых растет со временем, население быстро уменьшается. Следовательно, уравнение (2) представляет собой возрастающее с течением времени скопление населения в зарождающихся городах и может интерпретироваться, например, как перемещение населения из сельских районов в города.

Интерпретируя параметры модели, можно сказать, что они описывают различные социально-экономические условия территорий. Области, характеризующиеся значениями параметра p, близкими к единице, и значениями параметра a, близкими к нулю, соответствуют городам с длительной историей и устоявшимися традициями: например, в странах Западной Европы. Города, находящиеся в процессе формирования, характеризуются низкими значениями параметра p и высокими значениями параметра a – например, в странах Африки.

Особенности компьютерного моделирования

Введем следующее определение: *городом* будем называть большую группу связанных густозаселенных ячеек. Для определения числа городов, полученных в ходе имитационного моделирования, применялся кластерный анализ [10]. Использованный метод представляет собой иерархическую процедуру, суть которой заключается в последовательном присоединении ячеек с максимальным значением численности населения к наиболее схожим кластерам, где в качестве меры сходства используется евклидово расстояние. В двухмерном пространстве эта мера является реальным геометрическим расстоянием между объектами $d(X,Y) = (\sum_{i=1}^{k}(x_i - y_i)^2)^{1/2}$.

Метод представляет собой следующую последовательность шагов:

1. Задаем максимальный радиус города R (по данному значению радиуса будем производить сравнение, т. е. если расстояние между ячейками $< R$, то они принадлежат одному городу, если $> R$, то разным городам).
2. Находим максимально заселенную ячейку (ячейку с максимальным значением m).
3. Определяем ее в первую группу.
4. Находим следующую по величине максимально заселенную ячейку.
5. Вычисляем расстояние r между ней и имеющимися группами.
6. Если $r < R$, то присоединяем ячейку к близлежащей группе.
7. Иначе определяем ее в новую группу.
8. Повторяем шаги 4–7, пока не распределим все ячейки по группам.

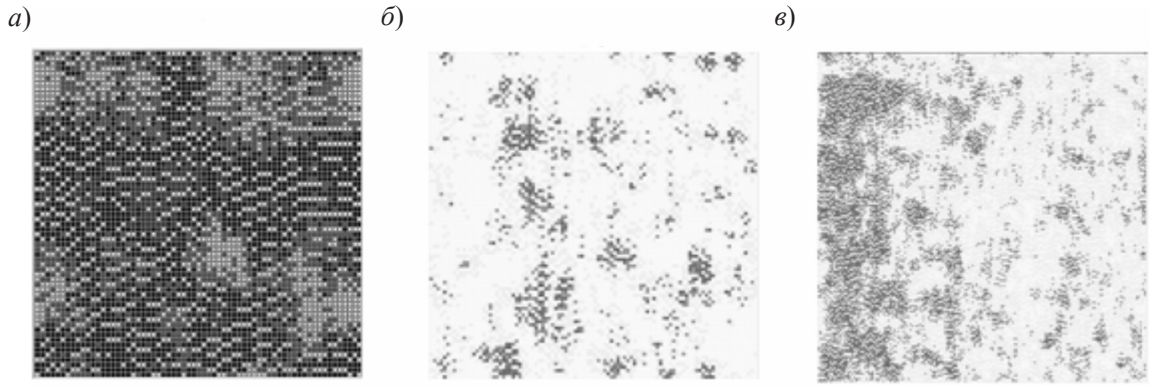


Рис. 2. Распределение населения:
а – на решетке размером 65×65, $p = 0{,}75$; $a = 0{,}25$ по истечении 85 итераций;
б – на решетке размером 180×180, $p = 0{,}75$; $a = 0{,}25$ по истечении 200 итераций;
в – на решетке размером 100×100, $p = 0{,}75$; $a = 0{,}1$ по истечении 200 итераций

9. Из сформированных таким образом групп считаем «городом» те, население которых превосходит пороговое значение P.

Иерархические процедуры по сравнению с другими кластерными процедурами дают более полный и тонкий анализ структуры исследуемого множества. Их привлекательная сторона – наглядность и возможность проследить за тем, объединение какой точки и кластера произошло и на каком шаге. Количество сформированных городов, полученное в результате применения описанного выше метода кластеризации, точно соответствует количеству, которое можно наблюдать на графическом представлении заселения территории, выводимом на экранной форме.

Описанная выше модель клеточного автомата и процедура кластеризации реализованы в виде программы, с помощью которой выполнено имитационное моделирование развития городов при различных значениях параметров модели, в различных пространственных масштабах и на различных интервалах времени. На рис. 2 представлено несколько полученных вариантов развития города. Рисунки иллюстрируют распределение численности населения при различных значениях параметров модели. Основная часть населения сосредоточена в более темных по цвету областях. Эти части могут быть проинтерпретированы как зарождающиеся города, к которым стремится остальное население области.

Программа позволяет произвести анализ распределения численности населения, полученного в ходе моделирования. Формируется массив, разбивающий рассматриваемую территорию на равные по величине численности населения интервалы. Далее, для каждого интервала считается

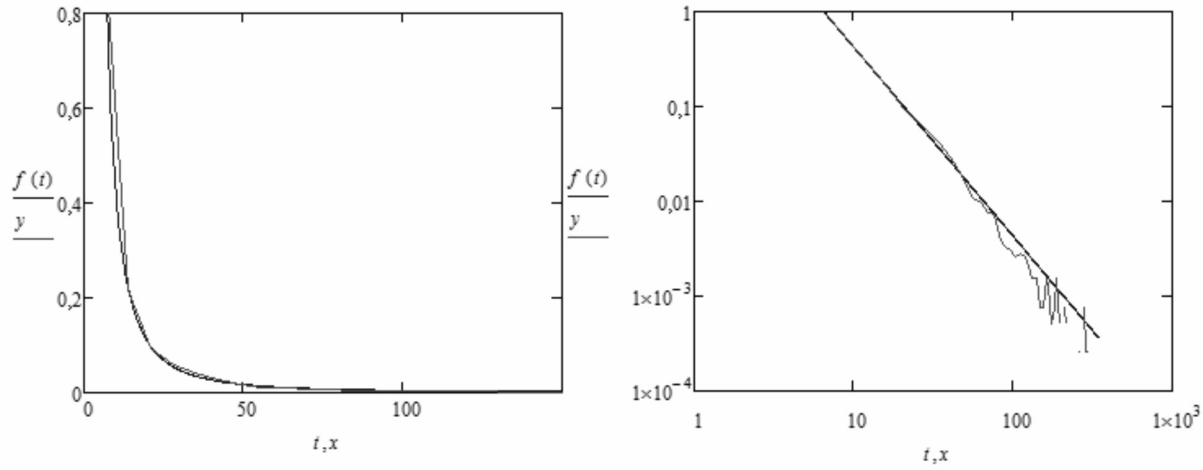


Рис. 3. График распределения населения, полученного в ходе компьютерного моделирования
Справа график представлен в логарифмическом масштабе по обеим осям

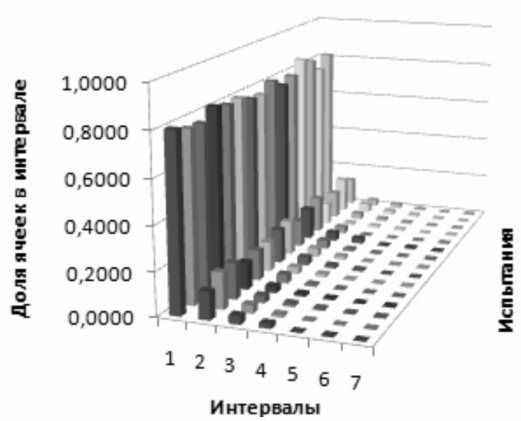


Рис. 4. Графики распределения населения по интервалам в серии из 15 испытаний

количество ячеек, численность населения которых соответствует данному промежутку. Полученные распределения в ходе компьютерного моделирования также абсолютно точно соответствуют степенной зависимости с показателем степени –2. Это мы можем видеть на рис. 3, где x, y – полученные данные распределения численности населения в ходе компьютерного моделирования на решетке размером 100×100, p = 0,55, a = 0,9 по истечении 75 итераций, при этом x – значение численности населения m, y – доля ячеек с данной численностью; $(t, f(t))$ – приближающая функция МНК с показателем степени –1,998.

С помощью критерия однородности χ^2 доказана гипотеза о том, что при определенном наборе параметров модели клеточного автомата в ходе компьютерного моделирования получается одинаковое распределение населения. Для этого проведена серия из 15 испытаний на решетке клеточного автомата размером 25×25, параметры модели при этом зафиксированы a = 0,25, p = 0,75. В ходе каждого испытания по истечении 40 итераций сформированы массивы распределения населения, состоящие из 7 интервалов, определяющие, сколько ячеек попало в каждый интервал. Величина интервалов определяется как максимальное значение ячейки m на решетке клеточного автомата, деленное на 7. Графики распределения населения по интервалам в проведенной серии испытаний представлены на рис. 4.

Рассчитанное значение статистики критерия равно 71,44, что меньше квантили распределения χ^2 с 84 степенями свободы при уровне значимости a = 80 % равной 72,94. Число степеней свободы рассчитывается исходя из числа испытаний и числа интервалов (15–1)·(7–1) = 84. Следовательно, гипотеза верна при заданном уровне значимости, а, значит, распределения населения, полученные в ходе каждого испытания, однородны.

Использование модели клеточного автомата позволяет сделать следующие выводы.

Данная модель может быть применена как для изучения эволюции территории отдельного города, так и для иллюстрации развития территории, включающей несколько городов, т. е. на разных масштабах рассмотрения проблемы.

Установлено удовлетворительное согласие результатов моделирования с теоретическими положениями и реальными статистическими данными.

Так, показатель степенной зависимости в распределении численности населения, полученной в ходе компьютерного моделирования, согласуется с практическими данными. А изменение параметров модели практически не влияет на значение показателя степени, что свидетельствует об универсальности закона. Установленный характер возникающих пространственно-временных образований обусловлен накоплением эффектов случайных мультипликативных событий, порождающих «перемежаемость» в формировании структуры города.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тоффоли, Т.** Машины клеточных автоматов [Текст] / Т. Тоффоли, Н. Марголус. –М.: Мир, 1991.

2. **Cheng, J.** Cellular Automata Based Temporal Process Understanding of Urban Growth [Text] / J. Cheng, I. Masser // Lecture Notes in Computer Science. –2002. –№ 2493. –P. 325–336.

3. **Ward, D.P.** Integrating spatial optimization and cellular automata for evaluating urban change [Text] / D.P. Ward, A.T. Murray, S.R. Phinn // Regional Science. –2003. –№ 37. –P. 131–148.

4. **Batty, M.** Modelling urban dynamics through GIS-based cellular automata [Text] / M. Batty, Y. Xie, Z. Sun // Computers, Environment and Urban Systems. –1999. –P. 205–233.

5. **Zipf, G.K.** Human behavior and the principle of least effort [Text] / G.K. Zipf. –Addison-Wesley, Cambridge MA, 1949.

6. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.gks.ru/doc_2010/bul_dr/chiSity10.zip

7. **Manrubia, S.C.** Transient dynamics and scaling phenomena in urban growth [Text] /S.C. Manrubia, D.H. Zanette // Fractals. –1999. –Vol. 7. –№ 1. –P. 1–8.

8. **Manrubia, S.C.** Role of Intermittency in Urban Development: A Model of Large-Scale City Formation [Text] / S.C. Manrubia, D.H. Zanette // Physical Review Letters. –1997. –Vol. 79. –№ 3. –P. 523–526.

9. **Зельдович, Я.Б.** Перемежаемость в случайной среде [Текст] / Я.Б. Зельдович, С.А. Молчанов // Успехи физических наук. –1987. –Т. 152. –Вып. 1. –С. 3–31.

10. **Айвазян, С.А.** Прикладная статистика: классификация и снижение размерности [Текст] / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков [и др.]. –М.: Финансы и статистика, 1989.

УДК 330.16

Т.А. Козелецкая, Е.А. Герман, А.Г. Дмитриев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАРДИНАЛИСТСКОЙ ПОЛЕЗНОСТИ

1. Предварительные замечания

Как известно, управление в социальных и экономических системах базируется, в т. ч. и на модельных представлениях о поведении покупателя. Рассматривая его, экономическая теория оказалась не в состоянии предложить количественную (кардиналистскую) модель полезности – ключевой величины, характеризующей ощущения удовлетворения потребителя, связывая это с нерешенностью задачи ее измерения по шкале отношений. В результате получил распространение так называемый *порядковый подход*, непродуктивность которого обнаружилась в попытках моделировать наблюдаемый в разных странах и в разное время рост потребления ряда товаров, несмотря на рост их цен. Более того, в работе [1] показана несовместимость аксиом порядкового подхода.

В этой связи представляется целесообразным в свете современных знаний рассмотреть ряд методологических вопросов, касающихся опыта построения математических моделей физики и технических наук. Воспользоваться ими для построения модели кардиналистской полезности с тем, чтобы использовать ее в теоретических обоснованиях предложений для лиц, принимающих решения в социальной сфере экономики.

О теории измерений. Задача определения количества свойства той или иной эмпирической системы рассматривается, как известно, в теории измерений. Если ориентироваться на тип рассматриваемых величин[1], получающихся в результате измерений, то можно выделить два подхода: *математический* и *физический* (или *метрологический*).

В рамках *математического подхода* измерение рассматривается как операция гомоморфного отображения эмпирической системы с отношениями на числовую систему с отношениями [2, 3]. Естественно, в рамках математического подхода подразумевается числовая система, состоящая из абстрактных, математических чисел, лишенных каких бы то ни было наименований. При этом авторы [2, 3] используют числовую систему, состоящую только из вещественных чисел, в то время как свойства эмпирических систем описываются и комплексными числами (электродинамика), а объектами математических исследований могут быть и другие числа (кватерионные, октионные и т. д.).

Следует отметить, что в предметных областях всегда используются числа другого типа – именованные. Строго говоря, они не являются объектами математического изучения и не могут рассматриваться как частный случай математических величин. В этой связи не следует забывать о корректном использовании математики в предметных областях. Но это уже забота пользователей математики.

На существование проблемы использования именованных величин в математических выражениях указывали еще основоположники математической теории измерений [2, с. 8]. Приведем цитату: «… В большинстве случаев читатель сталкивается с набором противоречивых и сбивающих с толку догм, объявляющих допустимыми … выполнение тех или иных правил. Обучая человека началам науки, мы предупреждаем его, что

[1] Будем использовать этот термин, не претендуя на его безупречную точность в отображении существа вопроса.

«не имеет смысла» складывать числа, относящиеся к разным свойствам, скажем к весу и росту, но в то же время, … предлагают изучающим физику умножать числа, связанные с такими понятиями, как скорость и время, или делить меру расстояния на меру времени. Почему же умножение «более осмыслено», чем сложение?».

Ответ на этот вопрос может быть дан такой.

Математические операции определены лишь на множестве *абстрактных* математических чисел. Например, на множестве натуральных чисел определено вычисление факториала; на множестве вещественных – вычисление логарифма, тригонометрических функций и др.

Операции на множестве именованных чисел в математике не определены. Операции с именованными числами определены лишь в предметных областях. Они содержатся *в дефинициях* соответствующих величин и количественных *законах* соответствующей области знаний. Это и делает их более осмысленными, если использовать терминологию Суппеса и Зинеса.

В рамках *физического подхода* измерение рассматривается как экспериментальная операция, познавательная процедура, основанная на сравнении (прямом или косвенном) количества свойства с его величиной, принятой за единицу [4]. Измерения с использованием инструментальных средств принято относить к категории метрологических, а без их применения – к категории экспертных оценок. В первом случае используют шкалы отношений или интервалов, а во втором – шкалы порядка. В рамках физического подхода можно рассматривать и так называемые *психологические* измерения – количественную оценку уровня восприятия того или иного свойства эмпирической системы (тяжести груза, громкости звука, светлости и т. п.). В этом случае сравнение происходит с «внутренним эталоном», в качестве которого могут выступать еле различимые разности стимула, физиологические пороги чувствительности органов (слуха, зрения) и др. [5]. В результате измерений в рамках физического подхода получают именованные числа.

В любой предметной области, в прикладных задачах, имеют дело с именованными величинами. Наименование каждой из величин указывает на использованную единицу ее измерения. Например, в утверждении «длина веревки 25 м» содержится информация о том, что единицей измерения длины служил метр. Если для той же веревки утверждается, что «длина веревки 2500 см», то в этом случае единицей измерения служил сантиметр.

Наличие именованных величин в математических моделях любой предметной области, в т. ч. и в экономике, неминуемо приводит к постановке вопроса об измерениях, о выборе единиц измерения, что, в свою очередь, ставит вопрос о выборе системы единиц измерения, ее основных и производных единиц. Последнее приводит к понятию «размерность»[2] величины и необходимости размерностного анализа уравнений. Эти вопросы хорошо разработаны в рамках физического подхода [6, 7] и широко используются в практике математического моделирования в физике и технике.

Об анализе размерностей. Следует отметить, что понятие «размерность» в физической и метрологической литературе несколько отличается содержанием. Физики считают, что оно относится к единицам измерения физических величин, что соответствует первоначальному замыслу Ж. Фурье, а метрологи – к самим физическим величинам. С точки зрения использования этого понятия в практике математического моделирования такое различие несущественно.

Под размерностью единицы измерения (величины) понимают символическое степенное выражение, составленное из символов основных единиц выбранной системы единиц измерения, с соответствующими показателями степени. Например, если в системе единиц, где основными выбраны единицы длины (L), массы (M) и времени (T) записать символическое степенное выражение для размерности площади ($\dim S$) в общем виде:

$$\dim S = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma}, \qquad (1)$$

то нетрудно видеть, что размерность площади будет:

$$\dim S = L^2 M^0 T^0 = L^2. \qquad (2)$$

Хорошо известно, что при использовании в математических выражениях именованных величин допустимыми, с точки зрения пригодности этих выражений для моделирования объектов и явлений в предметной области, могут быть толь-

[2] Понятие «размерность» в 1822 г. ввел Ж. Фурье в монографии «Аналитическая теория тепла», рассматривая связь изменений производных единиц измерения той или иной системы единиц с изменениями ее основных единиц.

ко такие, в которых знаками равенства (=), суммирования (+) и вычитания (–) соединены величины одного наименования, а, следовательно, и одной размерности. По терминологии Суппеса и Зинеса это «осмысленные» операции, а на языке теории размерностного анализа – требование размерностной однородности уравнения.

Это очевидное требование может быть дополнено и другими (математическими) ограничениями, вытекающими из определений (дефиниций) математических операций. Например, математические операции логарифмирования и вычисления тригонометрических функций определены только для абстрактных математических величин. Поэтому под этими операторами не могут находиться именованные величины. Это же относится и к показателям степеней. В физико-метрологических терминах – они должны быть безразмерными.

Следует отметить, что понятия «размерность» и «единица измерений» не являются синонимами, хотя в экономической литературе встречаются и обратные утверждения, например [8]. Единицы измерения, как и их системы, устанавливаются конвенциально, на основе соглашений. Размерности же единиц измерения (или величин) зависят от выбранной системы единиц и являются вторичными по отношению к единицам измерения. Величина может иметь единицы измерения и быть при этом безразмерной в любой системе единиц измерения. К примеру, плоский угол – величина безразмерная, поскольку в математике (!) количественно угол определяется как отношение длины дуги к ее радиусу (длины дуги окружности, проведенной из вершины угла произвольным радиусом). При этом единицами измерения угла могут быть угловые градусы, артиллерийские градусы, радианы, морские румбы и др.

Анализ размерностей в физико-математических моделях. В физико-математических моделях[3] можно выделить два направления использования размерностного анализа уравнений.

Первое – для проверки правильности математического отображения использованных в модели законов природы и определений (дефиниций) соответствующих величин. Вместе с этим он дает возможность выявить ошибки в математических преобразованиях.

Второе – в ряде случаев, если предварительно известно, какие физические величины «участвуют» в интересующем процессе и должны быть представлены в математической модели, можно с помощью сопоставления размерностей *установить вид зависимости*, которая связывает эти величины [6, гл. 3]. То есть сопоставление размерностей позволяет, совместно с другими обстоятельствами, построить математическую модель. Этой возможностью воспользуемся ниже.

Анализ размерностей в экономико-математических моделях. В экономико-математическом моделировании, где тоже используют именованные величины, все это не нашло должного распространения [8, с. 90]. На важность методологии размерностного анализа в экономико-математическом моделировании обращалось внимание в целом ряде работ, например [9–11]. Неприменение его нередко ведет к грубым ошибкам [12]. Подобное обнаруживается и в отношении многих функций ординалистской (порядковой) полезности.

Выпадение из методического арсенала экономико-математического моделирования технологии анализа размерностей произошло, на наш взгляд, по причине того, что в среде профессионалов моделирования доминирует математический подход к проблеме измерений. Измерение рассматривается как процедура отображения свойств эмпирической системы на множество вещественных чисел. А они, как известно, не имеют наименований и, следовательно, нет необходимости говорить о единицах измерений, системах единиц, размерностях и т. д.

Видимо, не случайно, в литературе можно встретить даже ошибочные утверждения. Например, цитируем: «Термин “размерность” эквивалентен по значению термину “единица измерения”» [8, с. 87]. Ошибочность его в том, что понятие «размерность» вторичное от понятия «единица измерения». О размерности можно говорить только после выбора системы единиц измерения, ее основных и производных единиц.

Сказанное выше показывает, что обсуждение разных аспектов корректного использования математики в предметных областях, по меньшей мере, целесообразно. Одному из них – использованию соображений размерности для установ-

[3] Математические модели технических наук считаем относящимися к этой же категории, поскольку в них используются законы физики.

ления вида зависимости между экономическими величинами (на примере уравнения кардиналистской полезности) посвящена данная статья

2. Уравнение кардиналистской полезности

В настоящее время в теории полезности доминирует порядковый подход, в основе которого лежит несколько аксиом. Их несовместимость в общем случае показана в работе [1], поэтому и пригодность порядковых функций полезности для моделирования в целом весьма сомнительна.

Количественная теория полезности не получила своего должного развития по причинам метрологического содержания. Не был найден способ измерения полезности, хотя единице полезности было дано наименование «ютил». При этом предполагалось, что измерения должны быть обязательно объективными. Такая точка зрения высказывается, по крайней мере, в учебной литературе при объяснениях причин отсутствия развитой количественной теории, например [13].

В этой связи уместен вопрос для какой цели нужна «объективизация» измерений полезности? Ведь требование «объективных» измерений в естественных науках и технике возникло в связи с практической необходимостью. В науке – это обмен количественными результатами исследований, в технике – это требование совместимости деталей при их сборке. При рассмотрении экономического поведения покупателей на рынке товаров и услуг подобных «необходимостей» нет. Полезность характеризует ощущение удовлетворения, которое субъективно по своей природе. Для анализа экономического поведения покупателей, т. е. множества персон, важно выявить общие закономерности их поведения и возможные отклонения от него и описать все это количественно. Ничто при этом не ограничивает использование величин субъективного содержания, своими численными значениями количественно характеризующими каждого покупателя.

Ниже будет показано, что в количественной теории полезности можно сделать существенный шаг в направлении ее развития, если использовать подход, основанный на достижениях науки об измерениях. Прежде всего, это касается результатов теории психологических измерений, а также и рекомендаций теории физических измерений по сопоставлению размерностей величин при решении задачи о функциональной связи между ними. Все это совместно с требованием корректной записи математических выражений с именованными величинами позволяет получить уравнение кардиналистской полезности и адекватно интерпретировать входящие в него величины, что и будет сделано ниже.

Дифференциальное уравнение кардиналистской полезности. Рассмотрим связь приращения полезности[4] (приращения ощущения удовлетворения), вызванного потреблением очередной порции блага с величиной этой порции. По существу, воспользуемся подходом основоположников теории предельной полезности. Однако в отличие от них воспользуемся еще и сведениями из психофизики, из теории психологических измерений, касающихся количественной оценки ощущений. Для целей нашего рассмотрения вполне достаточно лишь того, что психофизическое восприятие (y) малого приращения количества стимула (dx) зависит от его текущего, достигнутого уровня (x), что отражено в законе [14]. В соответствии с этим законом отношение dx/x (относительное приращение стимула) есть величина постоянная. На основе закона Вебера получен основной закон психофизики – закон Фехнера $y = a\ln x$ [14, с. 242].

Экономическое поведение покупателя, его решение покупать или не покупать, и, если покупать, то в каком количестве, определяется прежде всего его ощущением удовлетворения от ожидаемого потребления блага. В качестве меры приращения ощущения удовлетворения (приращения полезности (dU)) будет выступать относительное приращение стимула (относительное приращение количества блага (dx/x)). При рассмотрении связи между бесконечно малыми величинами достаточно ограничиться линейной связью между ними[5], т. е. можно написать:

$$dU = k \cdot \frac{dx}{x}, \qquad (3)$$

где k – коэффициент, необходимый для «выравнивания» размерностей левой и правой частей уравнения. Если именованную величину «полез-

[4] Под полезностью, как это и принято, будем понимать величину, характеризующую ощущение удовлетворения, вызванное потреблением благ, или ощущение ожидаемого удовлетворения, вызванное ожидаемым потреблением благ. Различий между ними делать не будем.

[5] Накопленный опыт математического моделирования в теоретической физике и технических науках показывает продуктивность линейного приближения в прикладных задачах.

ность», а, значит, и ее приращение, измерять в некоторых единицах под названием «ютил», как это и было предложено основоположниками количественной теории, то коэффициент k должен иметь размерность, совпадающую с размерностью полезности в любой системе единиц измерения.

Величины, входящие в уравнение (3), нетрудно интерпретировать исходя из следующего. Относительное количество приращения блага dx/x величина безразмерная, в то время как количество блага (x) и его приращение (dx) – величины размерные. Они могут измеряться в соответствующих физических единицах количества (единицах массы: килограммы, тонны и др. – для делимых благ; единицах объема: литры, баррели и др. – для жидких продуктов; в специфических экономических единицах: упаковки, пачки и др.). Приращение полезности dU и коэффициент k, как отмечалось выше, величины одной размерности, а, значит, и одного наименования. Учитывая, что dU – это приращение удовлетворения, коэффициент k можно называть *коэффициентом удовлетворения*. Экономический смысл коэффициента удовлетворения, очевидно, в следующем. Он показывает приращение ощущения удовлетворения при потреблении дополнительной относительной единицы блага.

Очевидно, что на множестве персон, потребляющих некоторое конкретное благо (i-е благо) коэффициент удовлетворения k персонифицирован и будет величиной случайной. Она отображает индивидуальные вкусы, привычки, традиции и т. п.

Приведенная интерпретация психофизического закона Вебера позволяет называть уравнение (3) дифференциальным уравнением полезности[6]. Основываясь на нем, получим количественное уравнение полезности.

Решение, отвечающее математическим требованиям корректной записи выражений с именованными величинами. Интегрирование уравнения первого порядка, как известно, дает многозначный результат, содержащий одну произвольную постоянную. Результат интегрирования (3) можно представить в виде двух различных математических выражений:

$$U = k \ln x + C_1, \tag{4}$$

$$U = k \ln \frac{x}{C_2}, \tag{5}$$

в которых C_1 и C_2 – произвольные постоянные.

Если бы величины, входящие в (3), (4) и (5), не имели наименований и представляли собой абстрактные математические объекты, то выражения (4) и (5) были бы эквивалентны друг другу, а произвольные постоянные C_1 и C_2 были бы связаны между собой очевидным соотношением:

$$C_1 = -k \ln C_2. \tag{6}$$

При построении графиков математических функций (4) и (5) затруднений не возникает.

Однако если величины U, x и k именованные, а, значит, и размерные, то и постоянные интегрирования C_1 и C_2 тоже должны быть именованными и размерными. Причем размерности этих констант разные. Постоянная C_1 должна иметь размерность полезности, а постоянная C_2 – размерность количества блага. В такой ситуации об эквивалентности (4) и (5) говорить не приходится. Уравнение (6), связывающее постоянные интегрирования теряет смысл и не может считаться справедливым по той причине, что математическая операция логарифмирования для именованных величин не определена и не может быть выполнена.

При попытке построить графики функций полезности (4) и (5) также возникают непреодолимые трудности, если действовать в строгих рамках математики. Связано это с тем, что математическая операция логарифмирования, как, впрочем, и некоторые другие, определена только для абстрактных математических величин, не имеющих наименований и остающихся безразмерными в любой системе единиц измерений.

Если же отбрасывать наименование и использовать только численное значение именованных величин, как это нередко и делают, то результат логарифмирования будет противоречить математическим свойствам логарифмической функции. Действительно, если x именованная величина, например, $x = 28$ м (что эквивалентно и $x = 28\,000$ мм, и $x = 0{,}028$ км и т. п.), то после отбрасывания наименования непонятно, какое из численных значений (28, 28 000 или 0,028 и т. п.) выбрать. Если же использовать их все, то получим несколько

[6] В работе [15] дифференциальное уравнение полезности получено исходя не из закона Вебера, как это сделано в данной работе, а на основе концепции использования достигнутого уровня того или иного показателя в качестве базового при рассмотрении задач экономического роста (метод индексов).

результатов (3,33; 10,24 или же –3,58 и т. п.), в то время как логарифмическая функция вещественного аргумента однозначна.

Требование корректной записи аргумента логарифмической функции заставляет отбросить (4) и использовать решение в форме (5). В этом выражении аргумент логарифмической функции – величина безразмерная, если размерности x и постоянной интегрирования C_2 одинаковые в любой системе единиц измерения. Учитывая это обстоятельство, решение дифференциального уравнения полезности (3) следует записывать в виде:

$$U = k \ln \frac{x}{x_0}, \qquad (7)$$

причем при любых значениях x_0 решение (7) удовлетворяет дифференциальному уравнению (3). Поэтому его можно называть *уравнением полезности потребления конкретного блага*.

Экономический смысл постоянной интегрирования x_0. Проведенное выше сопоставление размерностей левой и правой частей дифференциального уравнения (3) позволило интерпретировать коэффициент k как коэффициент удовлетворения.

Дадим интерпретацию величине x_0, основываясь на математических свойствах логарифмической функции.

Для этого введем безразмерные переменные: $\cancel{U} = \frac{U}{k}$ – безразмерная полезность; $\cancel{X} = \frac{x}{x_0}$ – безразмерное количество блага. Уравнение полезности (7) принимает вид:

$$\cancel{U} = \ln \cancel{X}, \qquad (8)$$

что в полной мере соответствует требованиям корректной записи математических выражений. Характерной точкой данной математической функции будет точка с абсциссой $\cancel{X} = 1$, т. к. при переходе через единицу логарифм меняет знак. Изменение знака безразмерной полезности означает изменение ощущения удовлетворения на ощущение неудовлетворения. В размерных переменных это происходит, когда оказывается, что $x < x_0$. Это дает основание интерпретировать x_0 как уровень нейтрального ($\cancel{U}\big|_{x=x_0} = 0$) потребления.

Полагая, как это и принято, что полезность – величина аддитивная, в случае потребления многих благ, полное число которых N, уравнение полезности следует записать:

$$U = \sum_{i=1}^{N} k_i \ln \frac{x_i}{x_{0i}}. \qquad (9)$$

3. Уравнение кардиналистской полезности в безразмерных переменных

Для целей корректного математического анализа уравнения кардиналистской полезности (9) запишем его в безразмерном виде.

Для этого обе части (9) разделим на $\sum_{i=1}^{N} k_i$ и введем безразмерные величины.

1. Безразмерные коэффициенты удовлетворения – $\cancel{k}_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^{N} k_i}$; видно, что

$$0 < \cancel{k}_i < 1, \text{ а } \sum_{i=1}^{N} \cancel{k}_i = 1. \qquad (10)$$

2. Безразмерное количество блага – $\cancel{x}_i = \frac{x_i}{x_{0i}}$; очевидно, что $\cancel{x}_i > 0$.

3. Безразмерная полезность – $\cancel{U} = \frac{U}{\sum_{i=1}^{N} k}$, которая может принимать значения $-\infty < \cancel{U} < +\infty$.

Ограничимся рассмотрением случая, когда количество каждого из потребляемых благ больше или равно его уровню нейтрального потребления, т. е. $\cancel{x}_i \geq 1$[7]. В этом случае безразмерная полезность будет $\cancel{U} \geq 0$.

В указанных обозначениях уравнение (9) принимает вид:

$$\cancel{U} = \sum_{i=1}^{N} \cancel{k}_i \ln \cancel{x}_i, \qquad (11)$$

где $\cancel{U}$, $\cancel{k}$, $\cancel{x}_i$ – математические, безразмерные величины.

Введенные безразмерные величины можно рассматривать как результат измерения каждой из них по шкале отношений с использованием соответствующих единиц измерения. Полезность и коэффициенты удовлетворения «измерены» в единицах суммы коэффициентов удовлетворения, количества каждого из потребляемых благ «измерены» в единицах их нейтральных уровней потребления.

Использование безразмерных величин позволяет корректно использовать весь арсенал математического анализа. Воспользуемся этим обстоятельством для случая потребления двух благ, поскольку результаты можно представить графически.

---

[7] Случай, когда количество того или иного блага $\cancel{x}_i < 1$ не представляет интереса, т. к. при этом удовлетворение от его потребления исчезает.

Полезность потребления двух благ. Кривые постоянной полезности. Для полезности потребления двух благ (11) можно записать:

$$U = k_1 \cdot \ln x_1 + k_2 \cdot \ln x_2 \qquad (12)$$

или

$$U = \ln(x_1^{k_1} \cdot x_2^{k_2}), \qquad (13)$$

где $x_1 \geq 1$ и $x_2 \geq 1$, а также в соответствии с (10):

$$k_1 + k_2 = 1. \qquad (14)$$

Безразмерную полезность U можно изобразить в виде поверхности. Ее сечения плоскостями, параллельными плоскости $x_1 0 x_2$, образуют так называемые *линии уровня*. Их вид определяется выражением (13), если в него подставить фиксированные значения полезности ($U = U_{fix} = \text{const}$), т. е. будут определяться уравнениями вида:

$$U_{fix} = \ln(x_1^{k_1} \cdot x_2^{k_2}). \qquad (15)$$

С учетом (14) несложно получить уравнения кривых уровня:

$$x_2 = \exp\left(\frac{U_{fix}}{k_2}\right) \cdot x_1^{1-\frac{1}{k_2}}. \qquad (16)$$

Для двух значений безразмерной полезности $U_{fix} = 2$ и $U_{fix} = 3$ линии уровня приведены на рис. 1 при различных значениях безразмерных коэффициентов удовлетворения. Кривые, соответствующие большим значениям коэффициента удовлетворения, как бы «прижимаются» к соответствующим осям благ.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что безразмерные кривые постоянной полезности, соответствующие различным значениям коэффициентов удовлетворения, пересекаются в одной точке.

Возникает вопрос, является ли это обстоятельство случайностью, обусловленной выбором численных значений безразмерной полезности $U_{fix} = 2$ и $U_{fix} = 3$, либо оно должно наблюдаться при любых ее значениях.

Убедимся в справедливости последнего предположения и найдем связь координат точки пересечения с численным значением безразмерной полезности.

Для этого воспользуемся уравнением кривых постоянной полезности (16) и найдем координаты точки пересечения двух кривых, соответствующих некоторым разным безразмерным коэффициентам удовлетворения. Координаты точки пересечения (x_1^*) и (x_2^*) будут определяться соотношениями:

$$\begin{cases} x_2^* = \exp U_{fix} \\ x_1^* = \exp U_{fix} \end{cases}, \qquad (17)$$

не содержащими коэффициентов удовлетворения.

Таким образом, можно считать доказанным существование общей точки для всех кривых постоянной полезности, представленной в безразмерных переменных, вне зависимости от коэффициентов удовлетворения для каждой из них.

Из (17) видно, что $x_1^* = x_2^*$, поэтому эту точку хочется назвать *точкой равного* потребления. Равного, но в единицах нейтрального уровня потребления каждого блага, а не в физических единицах измерения. Поэтому будем использовать

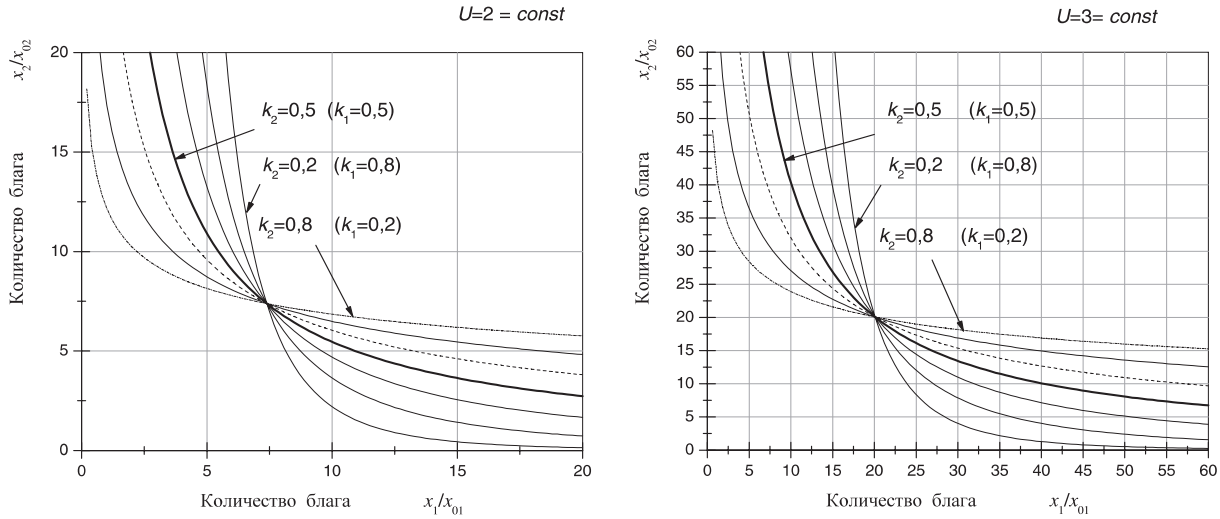


Рис. 1. Кривые постоянной полезности при различных значениях коэффициентов удовлетворения

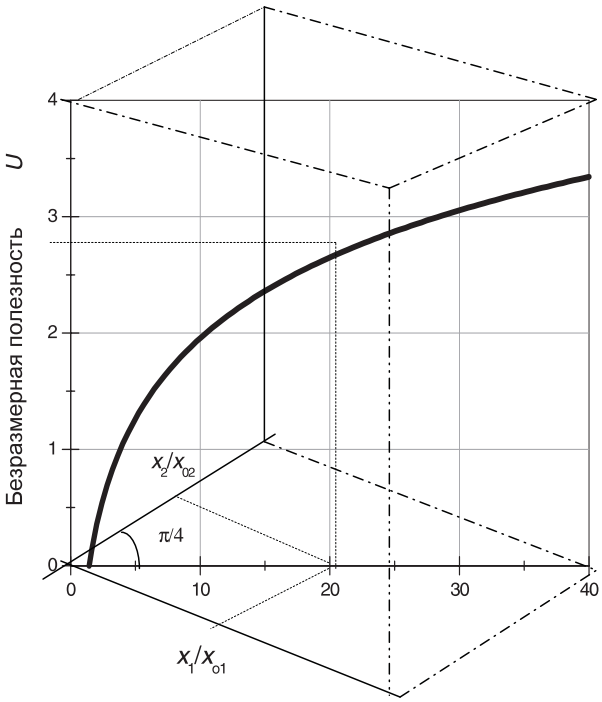


Рис. 2. Безразмерная кривая равновеликих потреблений

термин «равновеликое» потребление. Если задавать разные значения U_{fix}, то в каждой плоскости $U = U_{fix}$ будет обнаруживаться аналогичная картина.

Множество точек равновеликого (в единицах нейтрального уровня) потребления на поверхности полезности образуют линию. Ее можно называть *кривой равновеликих потреблений*. Несложно заметить, что эта кривая будет представлять собою пересечение поверхности полезности с плоскостью, проходящей через ось полезности ($0U$) под углами $\frac{\pi}{4}$ с осями благ $0x_1$ и $0x_2$, что и показано на рис. 2.

О кривых безразличия. Карты безразличия. Если рассматривать бинарное потребление двух взаимозаменяемых благ x_1 и x_2, предназначенных для удовлетворения некоторой потребности, и оценивать отношение потребителя к разным наборам этих благ, то, как предложил Парето, целесообразно использовать термин «безразличие». Например, потребность в животном белке можно удовлетворять разными видами мяса: говядиной, свининой, кониной, курятиной и т. п. В случае бинарных (или N-арных) наборов потребителю действительно может быть безразлично какой из наборов, составленных из этих продуктов, потре-

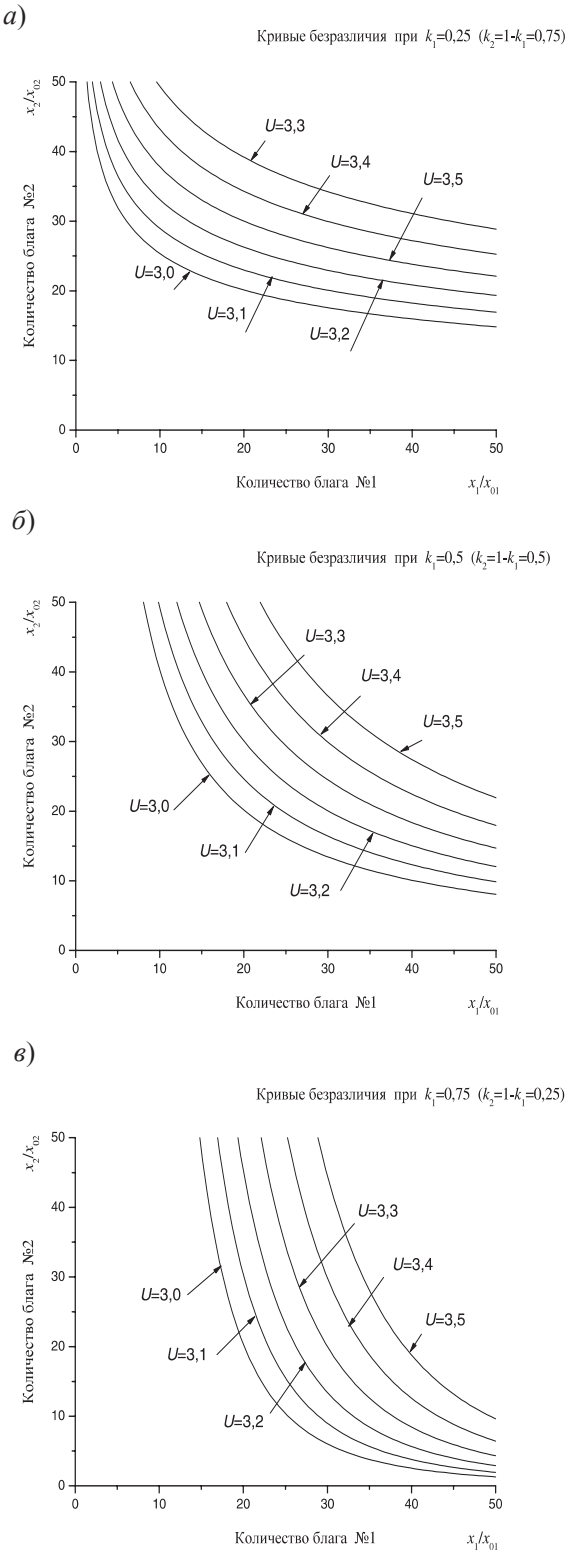


Рис. 3. Карта безразличия потребителя:
а – безразмерные коэффициенты удовлетворения $k_1 = 0{,}25$ и $k_2 = 0{,}75$; *б* – безразмерные коэффициенты удовлетворения $k_1 = 0{,}50$ и $k_2 = 0{,}50$; *в* – безразмерные коэффициенты удовлетворения $k_1 = 0{,}75$ и $k_2 = 0{,}25$

блять. В этом случае кривые постоянной полезности можно называть *кривыми безразличия потребителя*, а их набор, соответствующий различным значениям полезности, называть *картой безразличия потребителя*. Примеры некоторых из них представлены на рис. 3.

Если же рассматривать в наборе произвольные, невзаимозаменяемые блага, как это делал Дж. Хикс и его последователи в рамках порядковой теории спроса, то о безразличии покупателя говорить, по меньшей мере, некорректно, поскольку произвольные, невзаимозаменяемые блага не могут удовлетворить конкретную потребность. Подробнее о критике позиции Дж. Хикса и его последователей сказано в [1].

В заключение отметим, что только безразмерное уравнение кардиналистской полезности позволяет количественно связать полезность и количества потребляемых благ, измеренных в соответствующих единицах и дать математически корректные графические образы кривых постоянной полезности и кривых безразличия потребителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №11-06-00319-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козелецкая, Т.А.** Теория потребительского спроса: о совместимости аксиом порядкового подхода [Текст] / Т.А. Козелецкая, А.Г. Дмитриев, Е.А. Герман // Журнал экономической теории. –Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН РФ, 2009. –№ 3. –С.195–203.

2. **Суппес, П.** Основы теории измерений [Текст] / П. Суппес, Дж. Зинес // Психологические измерения. –М.: Мир, 1967. –196 с.

3. **Пфанцагль, И.** Теория измерений [Текст] / И. Пфанцагль. –М.: Мир, 1976. –248 с.

4. ISO 31-01. Междунар. стандарт. General principles concerning quantities, units and symbols [Электронный ресурс] / Опубл. 01.07.1981.

5. **Бардин, К.В.** Проблема порогов чувствительности и психофизические методы [Текст] / К.В. Бардин. –М., 1976. –245 с.

6. **Сена, Л.А.** Единицы физических величин и их размерности [Текст] / Л.А. Сена. –М.: Наука, 1988. –431 с.

7. **Чертов А.Г.** Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы): Справ. пособие [Текст] / А.Г. Чертов. –М.: Высш. шк., 1990. –335 с.

8. **Раяцкас, Р.Л.** Количественный анализ в экономике [Текст] / Р.Л. Раяцкас, М.К. Плакунов. –М.: Наука, 1987. –392 с.

9. **Гладышевский, А.И.** Размерностный анализ для экономистов. Ф.Й. Де Йонг [Текст] / А.И. Гладышевский // Экономика и математические методы. –1970. –Т. 6. –№ 3. –С. 477–480.

10. **De Jong.** Dimensional Analysis for Economists [Text] / De Jong, J. Frits. –N.Y.: Humanities Press, Inc., 1967. –223 p.

11. **Karman, D.J.** The application of dimensional analysis to business economics and accounting [Text] / D.J. Karman, J. Wagensveld // Paper prepared for the 19th Annual Congress of the European Accounting Association. –Bergen, Norway, Erasmus University Rotterdam, 1996.

12. **Эдельгауз, Г.Е.** Достоверность статистических показателей [Текст] / Г.Е. Эдельгауз. –М.: Статистика, 1977. –128 с.

13. **Гальперин, В.М.** Микроэкономика: в 2-х т. [Текст] / В.М. Гальперин, С.М. Игнатьев, В.И. Моргунов; Общ. ред. В.М. Гальперина. –СПб.: Экономическая школа, 1994. –Т. 1. –349 с.

14. **Фресс, П.** Экспериментальная психология [Текст] / П. Фресс, Ж. Пиаже; Пер. с франц.; Под ред. А.Н. Леонтьева. –М.: Прогресс, 1966. –430 с.

15. **Дмитриев, А.Г.** Теория потребительского спроса: психофизическое обоснование дифференциального уравнения кардиналистской полезности; интерпретация решения [Текст] / А.Г. Дмитриев, Т.А. Козелецкая, Е.А. Герман // Журнал экономической теории. –Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН РФ, 2010. –№ 1. –С.111–117.

УДК 658.512:004.42,658.512:519.87

К.Г. Жуков

АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ФОРМУЛАМ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ РУНГЕ-КУТТА

Вычислительные структуры для потоковых задач

В монографии [1] рассматриваются базовые принципы создания реконфигурируемых мультиконвейерных вычислительных структур, ориентированных на выполнения потоковых задач. К потоковым задачам относятся задачи обработки больших массивов (потоков) данных по одному и тому же алгоритму. Примерами таких задач могут служить задачи математической физики, численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, цифровой обработки сигналов, криптографии и т. д.

В общем случае потоковую задачу можно сформулировать следующим образом. Предположим, что существует упорядоченное множество векторных данных $D_i < d_1^i, d_2^i, ..., d_k^i >$, $(i = 1, 2, ..., N)$, каждый элемент которого должен быть обработан по фиксированному алгоритму, представляемому в виде графа $G(Q, X)$ (рис. 1).

Каждой вершине $q_j \in Q$ графа $G(Q, X)$ поставлена в соответствие операция O_j, входящая во множество допустимых операций O. Любая дуга $(q_j, q_{j+1}) \in X$ определяет, что результат операции O_j является входным операндом для операции O_{j+1}, поставленной в соответствие вершине q_{j+1}.

Задача потоковой обработки состоит в преобразовании потока векторов входных данных D_i $(i = 1, 2, ..., N)$ в поток векторов выходных данных $B_i < b_1^i, b_2^i, ..., b_L^i >, (i = 1, 2, ..., N)$ в соответствии с графом – алгоритма $G(Q, X)$. Решение поставленной задачи можно выполнить на последовательной ЭВМ с фон-неймановской архитектурой (рис. 2).

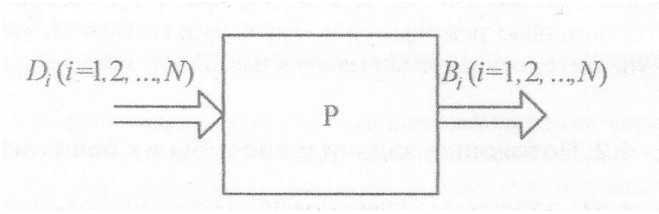


Рис. 2. ЭВМ с фон-неймановской архитектурой

Процессор P необходимо запрограммировать на последовательное выполнение операций $O_i(i = 1, 2, ..., M)$, соответствующих вершинам графа $G(Q, X)$, и затем обеспечить ввод последовательности векторов D_i $(i = 1, 2, ..., N)$.

Время обработки N векторов входных данных определяется выражением

$$T_{\text{реш}} = N \sum_{i=1}^{M} f(O_i)\tau, \qquad (1)$$

где $M=|Q|$ – число вершин на графе–алгоритма $G(Q, X)$; $f(O_i)$ – число тактов работы ЭВМ при выполнении операции O_i, соответствующей вершине графа–алгоритма $G(Q, X)$; τ – продолжительность такта.

Критерием оценки выполнения задачи является условие $T_{\text{реш}} < T_{PB}$. Здесь T_{PB} – заданное время на обработку всех векторов входных данных. Если условие выполняется, то такой вариант реализации следует признать эффективным с точки зрения простоты реализации. Однако при достаточно малых значениях T_{PB} условие $T_{\text{реш}} < T_{PB}$ не будет выполняться.

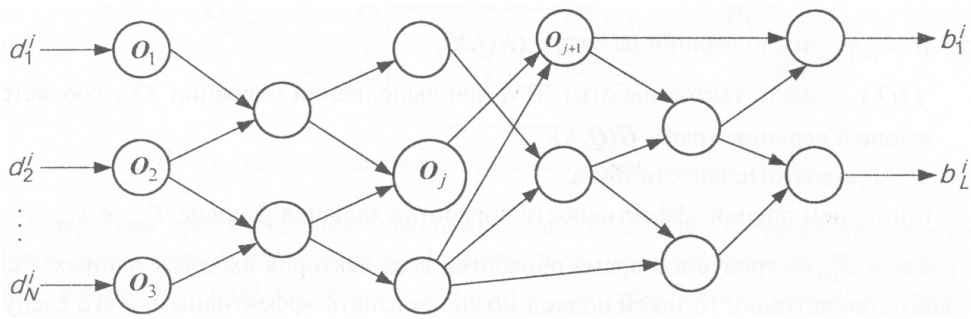


Рис. 1. Граф алгоритма

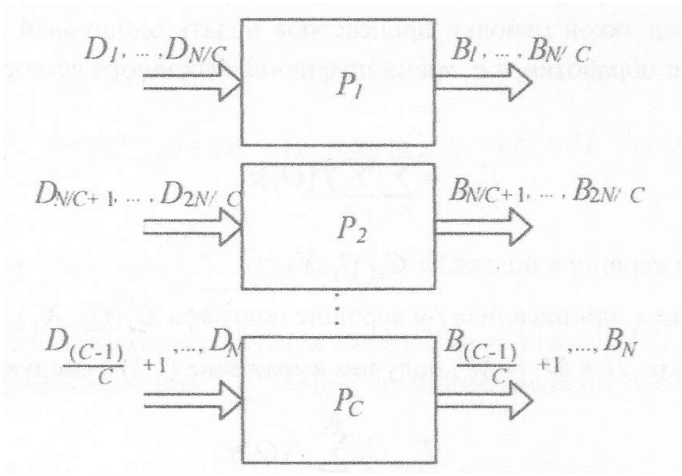


Рис. 3. Параллельный способ обработки векторов данных

Очевидным путем сокращения времени обработки $T_{реш}$ входных массивов является распараллеливание процесса обработки. В простейшем случае такой способ подразумевает наличие C процессоров P_i $(i = 1, 2, ..., C)$, каждый из которых может работать независимо от других процессоров. Разумеется, что если каждый из процессоров P_i $(i = 1, 2, ..., C)$ запрограммирован на реализацию графа–алгоритма $G(Q, X)$, а множество входных векторов D_i $(i = 1, 2, ..., N)$ разбито на N/C непересекающихся подмножеств, то каждое из подмножеств может быть обработано на процессоре P_i независимо, т. е. параллельно с другими подмножествами (рис. 3).

В этом случае время решения будет составлять:

$$T_{реш} = N / C \sum_{i=1}^{M} f(O_i)\tau. \qquad (2)$$

По сравнению с (1) $T_{реш}$ сокращается в C раз.

Время решения задачи можно сократить и другим способом, который принято называть *конвейерной обработкой*. К недостаткам такого метода можно отнести необходимость непрерывного поступления вектора входных данных D_i $(i = 1, 2, ..., N)$ на первую ступень конвейера, состоящего из H ступеней (процессоров). Основное преимущество конвейерного способа по сравнению с параллельным – сокращение числа входных и выходных каналов – для многих задач является несущественным. Для таких задач число операций M на графе значительно больше числа входных векторов N.

Естественный путь увеличения скорости обработки информации в конвейере – это распараллеливание обработки на каждой его ступени (рис. 4).

Время обработки потока из N векторов на этом конвейере будет составлять

$$T_{реш} = (N + H - 1) * \Delta T, \qquad (3)$$

причем для данного случая

$$\Delta T = \max_{i=1...H}(T^i_{реш}) = \max_{i=1...H}(\max_{j=1...M} f(O^i_j) * \tau) =$$
$$= \max_{i=1...M} f(O_i) * \tau,$$

где $\max_{i=1...M} f(O_i)$ – наиболее длительная операция, входящая в состав вершин графа $G(Q, X)$.

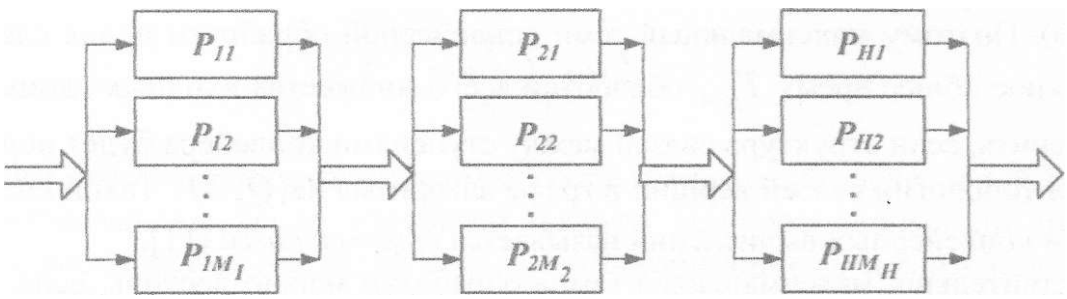


Рис. 4. Представление i-й ступени конвейера в виде M_i параллельно работающих процессоров

При большом значении N, а также полагая, что $M_i \approx \frac{M}{H}$, выражение (3) можно представить в приближенном виде:

$$T_{\text{реш}} = N \frac{\sum_{j=1}^{M} f(O_j) * \tau}{H * M / H} = \frac{N}{H} \sum_{j=1}^{M} f(O_j) * \tau . \quad (4)$$

Таким образом, время решения по сравнению с обычным конвейером сокращается приблизительно в $\frac{M}{H}$ раз, где M – число вершин в графе $G(Q, X)$; H – число ступеней конвейера.

Такая схема будет эффективна только при условии, что все вершины подграфа $G(Q_i, X_i)$ ($i = 1, 2, \ldots, H$) информационно независимы и могут быть реализованы параллельно (одновременно).

В общем случае операционные вершины подграфов $G(Q_i, X_i)$ являются информационно зависимыми, т. е. некоторая вершина $q_j \in Q_i$ не может быть реализована до тех пор, пока не получен результат реализации вершины $q_{j-1} \in Q_i$. Поэтому максимальный темп конвейерной обработки и, как следствие, $T_{\text{реш}}$ обработки всего множества входных данных можно обеспечить, если структура связей между ступенями конвейера будет полностью адекватна топологии связей вершин в графе–алгоритма $G(Q, X)$.

Такой способ организации конвейерных вычислений называется *структурным*. Максимального темпа обработки можно достичь, если каждой операционной вершине q_i ($i = 1, 2, \ldots, M$) графа–алгоритма поставить в соответствие свой процессорный элемент P_i ($i = 1, 2, \ldots, M$) и обеспечить связи между P_i согласно топологии информационных дуг графа $G(Q, X)$ (рис. 5).

Если на вход такой вычислительной структуры последовательно подавать вектора D_i ($i = 1, 2, \ldots, N$) входного множества, то время их обработки составит $T_{\text{реш}} = (N + H_{\max} - 1) * \Delta T$, где $H_{\max}$ – число вершин на критическом пути в графе $G(Q, X)$. Критическим путем является тот путь, для которого значение $\sum_{j=1}^{M} f(O_j) * \tau$ максимально; O_j ($j = 1, 2, \ldots, K$) – операции, принадлежащие вершинам критического пути; $\Delta T = \max_{j=1\ldots H} (f(O_j)) * \tau$ – время выполнения наиболее длительной операции, принадлежащей вершинам критического пути. При большом значении N и учете того, что

$$\Delta T = \max_{i=1,2,\ldots,H_m} f(O_j) \approx N \frac{\sum_{j=1}^{M} f(O^i{}_j)}{M},$$

получаем

$$T_{\text{реш}} = \frac{N}{M} \sum_{j=1}^{M} f(O_j) * \tau . \quad (5)$$

Анализируя выражение (5) можно сделать вывод о том, что при структурном способе организации обеспечивается минимальное время по сравнению с рассмотренными выше способами организации вычислительных систем (см. (1), (2), (4)).

Можно заметить, что вычислительная структура, представленная на рис. 5, сочетает в себе как параллельный, так и конвейерный способ обработки информации, поскольку входные данные обрабатываются одновременно по различным конвейерным цепочкам процессоров. Конвейерную структуру такого типа авторы монографии [1] называют *мультиконвейерной вычислительной структурой* (МКВС) и считают ее наиболее эффективной для решения потоковых задач.

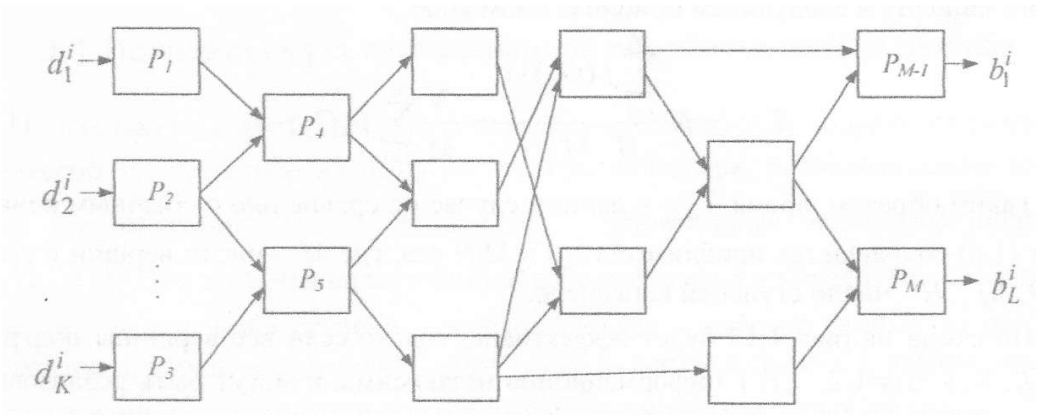


Рис. 5. Структурные конвейерные вычисления

Основные задачи статьи

Статья посвящена решению следующих задач:

математическому описанию разработанного алгоритма параллельных вычислений по формулам Рунге–Кутта четвертого порядка точности;

созданию в среде LabVIEW виртуального параллельного решателя;

сравнению структуры вычислителя (решателя) со структурами решателей, используемых в инструментальной среде моделирования LabVIEW;

тестированию параллельного решателя;

формулировке требований к элементной базе для аппаратной реализации параллельного решателя.

Математическое описание разработанного алгоритма

В настоящее время решение обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) на ЭВМ с фон-неймановской структурой выполняется методом Рунге–Кутта четвертого порядка. Метод численного интегрирования (ОДУ) разработан немецким математиком Рунге и модифицирован Кутта в начале XX в. [2].

Рекуррентные формулы для уравнения

$$dy / dt = f(y,t), y(0) = y_0 \tag{6}$$

имеют следующий вид:

$$k_1 = f(y_i, t_i); \tag{7}$$

$$k_2 = f(y_i + h / 2 * k_1, t_i + h / 2); \tag{8}$$

$$k_3 = f(y_i + h / 2 * k_2, t_i + h / 2); \tag{9}$$

$$k_4 = f(y_i + h * k_3, t_i + h); \tag{10}$$

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + h / 6 * (k_1 + 2 * k_2 + 2 * k_3 + k_4) = \\ &= y_i + h / 6 * k_1 + h / 3 * k_2 + h / 3 * k_3 + h / 6 * k_4 . \end{aligned} \tag{11}$$

На каждом i-м шаге интегрирования необходимо производить последовательные вычисления по формулам (7)–(11). Последовательная структура алгоритма вычислений исключает возможность организации параллельного (одновременного) вычислительного процесса. Выполним преобразование выражения (11) путем подстановки k_1 в правую часть (8); вычисленного значения k_2 в правую часть (9) и т. д.

Для уравнения (6) с $f(y,t) = a * y + b * x(t)$ преобразованное выражение (11) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + h / 6 * (a * y_i + b * x_i) + \\ &+ 2 * h / 3 * [a * y_i + b * (x_i + h / 2)] + \\ &+ h / 6 * [a * y_i + b * (x_i + h)] + \\ &+ a * h^2 / 6 * (a * y_i + b * x_i) + \\ &+ 2 * a * h^2 / 6 * [a * y_i + b * (x_i + h / 2)] + \\ &+ a^2 * h^3 / 12 * (a * y_i + b * x_i) + \\ &+ a^2 * h^3 / 12 * [a * y_i + b * (x_i + h / 2)] + \\ &+ a^3 * h^4 / 24 * (a * y_i + b * x_i). \end{aligned} \tag{12}$$

Для сокращения общего числа операций в (12) целесообразно операции умножения на постоянные коэффициенты, стоящие перед круглыми и квадратными скобками, выполнить до начала вычислительного процесса. В результате получим:

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + (a_1 * y_i + b_1 * x_i) + \\ &+ [a_2 * y_i + b_2 * (x_i + h / 2)] + \\ &+ [a_1 * y_i + b_1 * (x_i + h)] + (a_3 * y_i + b_3 * x_i) + \\ &+ [a_4 * y_i + b_4 * (x_i + h / 2)] + \\ &+ (a_5 * y_i + b_5 * x_i) + [a_5 * y_i + b_5 * (x_i + h / 2)] + \\ &+ (a_6 * y_i + b_6 * x_i), \end{aligned} \tag{13}$$

где коэффициентам $a_1, b_1, a_2, b_2, \ldots, a_6, b_6$ присвоены значения:

$a_1 = a * h / 6;\ b_1 = b * h / 6;$

$a_2 = a * 2 * h / 3;\ b_2 = b * 2 * h / 3;$

$a_3 = a^2 * h^2 / 6;\ b_3 = b * a * h^2 / 6;$

$a_4 = 2 * a^2 * h^2 / 6;\ b_4 = b * 2 * a * h^2;$

$a_5 = a^3 * h^3 / 12;\ b_5 = b * a^2 * h^3 / 12;$

$a_6 = a^4 * h^4 / 12;\ b_6 = b * a^3 * h^4 / 12.$

Выполним сравнение двух вариантов реализации формул Рунге–Кутта по числу выполняемых операций умножения и сложения на i-м шаге интегрирования. Для классического способа (см. (7)–(11)) необходимо 15 операций умножения и 11 операций сложения. Новый алгоритм (см. (13)) требует выполнения 16 операций умножения и сложения. Можно заметить незначительный рост в числе операций (6 операций).

Основным преимуществом нового алгоритма является возможность параллельного (одновременного) вычисления восьми слагаемых, заключенных в круглые и квадратные скобки (13), и затем – восьми операций сложения.

Создание виртуального решателя

Реализацию решателя ОДУ выполним в ин-

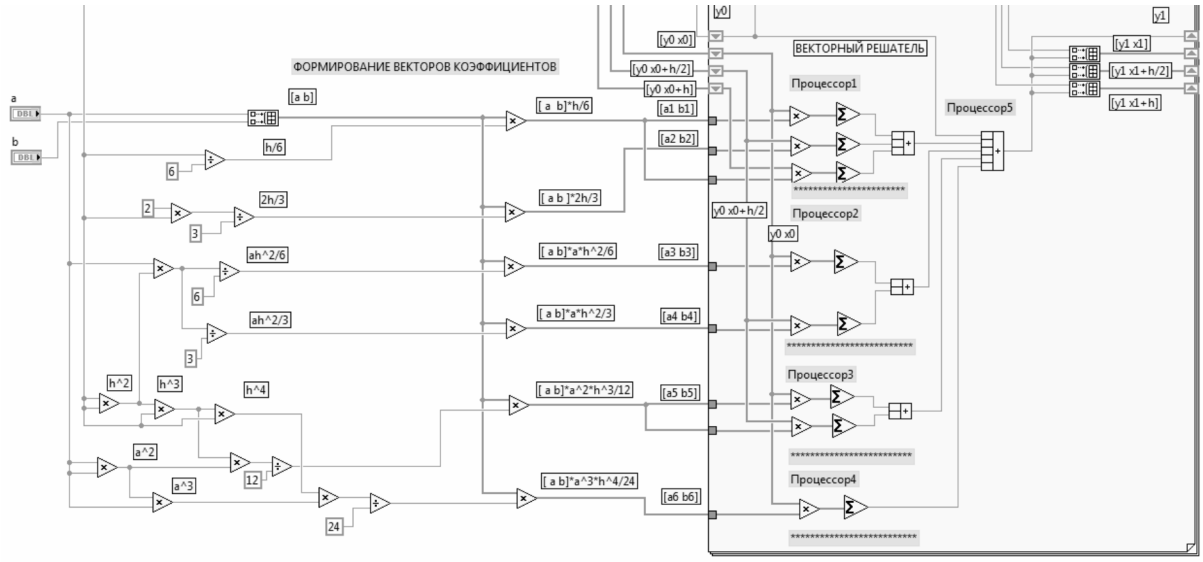


Рис. 6. Блок-диаграмма параллельного векторного решателя

струментальной среде разработки виртуальных приборов (ВП) LabVIEW 2010 фирмы National Instruments. Выбор среды LabVIEW обусловлен несколькими важными ее свойствами:

графическим способом программирования;

потоковым принципом вычислений;

возможностью выполнения векторных операций;

наличием встроенного решателя ОДУ методом Рунге–Кутта четвертого порядка.

Тестирование решателя проведем на примере ОДУ

$dy/dt = a*y + b*t$ с $y(0) = 1$ и $a = b = 1$.

Блок-диаграмма виртуального решателя представлена на рис. 6. В левой части блок-диаграммы производится формирование шести векторов коэффициентов $[a_1\ \ b_1]$, $[a_2\ \ b_2]$, …, $[a_6\ \ b_6]$ и трех векторов $[y_0\ \ x_0]$, $[y_0\ x_0+h/2]$, $[y_0\ x_0+h]$ с компонентами, определяющими начальное значение y_0 зависимой переменной y и значения возмущающей функции $(x(t) = t)x_0$, $x_0 + h/2$, $x_0 + h$ в начале, середине и в конце промежутка интегрирования.

В теле цикла размещены пять процессоров. Четыре процессора (Процессор 1, …, Процессор 4) построены на базе восьми векторных умножителей, восьми векторных сумматоров и трех скалярных сумматоров. На выходах процессоров формируются значения приращений решения y_i, которые суммируются со значением y_0, на скалярном сумматоре, вычисляющем значение y_{i+1}, (см. (13)). Последний сумматор входит в состав Процессора 5, дополнительно формирующего новые векторы $[y_1\ x_1]$,$[y_1\ x_1 + h/2]$,$[y_1\ x_1 + h]$.

Основной цикл реализован на основе структуры LabVIEW For Loop. Для выполнения итерационных вычислений в структуре предусмотрены так называемые *сдвиговые регистры* (Shift Registers). Сдвиговые регистры обеспечивают хранение и перезапись значений переменных, например, при реализации присваивания $y_i = y_i + 1$ после окончания i-й итерации. Регистры допустимо применять и при работе с векторами. В блок-диаграмме используется семь сдвиговых регистров.

Тестирование векторного решателя

Для оценки правильности выражений (13) и проверки работоспособности виртуального векторного решателя в состав блок-диаграммы включен функциональный блок ODE Runge–Kutta 4-th Order.vi, входящий в состав библиотеки математических функций NI_Gmath.lvlib. Блок-диаграмма стандартного решателя представлена на рис. 7.

На блок-диаграмме отчетливо отражена реализация последовательности выражений (7)–(11). С помощью четырех функциональных блоков R-K $f(x, y)$ вычисляются значения k_1, k_2, k_3, k_4. Узел Formula Node реализует часть выражения (11) (без выполнения умножения на значение шага интегрирования h). Вычисления завершают блок умножения ($h*phi$) и сумматор ($\boldsymbol{x_1} = \boldsymbol{x_0} + +h*phi$). Данные представлены в основном в век-

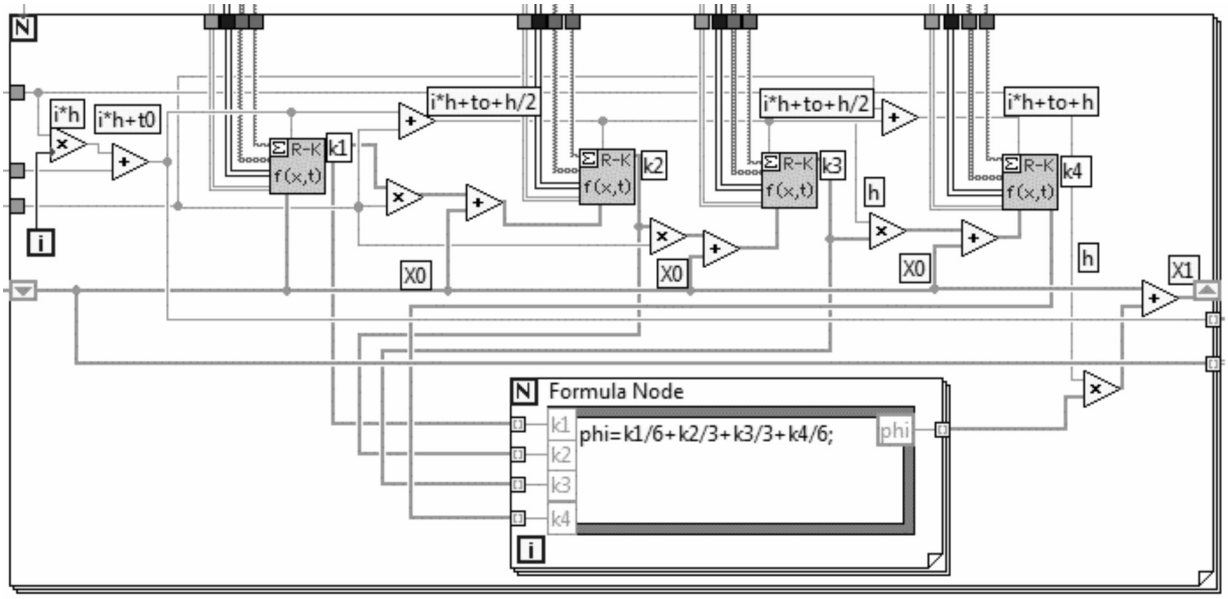


Рис. 7. Блок-диаграмма стандартного решателя LabVIEW

торном виде. Векторная реализация обеспечивает решение систем дифференциальных уравнений. Значения k_1, k_2, k_3, k_4 в каждом из четырех блоков R-K $f(x, y)$ вычисляются для всех уравнений системы «параллельно». Результаты интегрирования тестового уравнения представлены на лицевой панели виртуального векторного решателя (рис. 8).

В окне Waveform Graph изображены совпадающие графики изменения погрешности двух вариантов построения решателей (Error Y_1, Error Y_2). Точные значения вычисляются по аналитическому решению тестового уравнения $y(t) = 2 * e^t - t - 1$. Максимальные значения погрешностей для шага интегрирования h = 0,01 на всем отрезке интегрирования

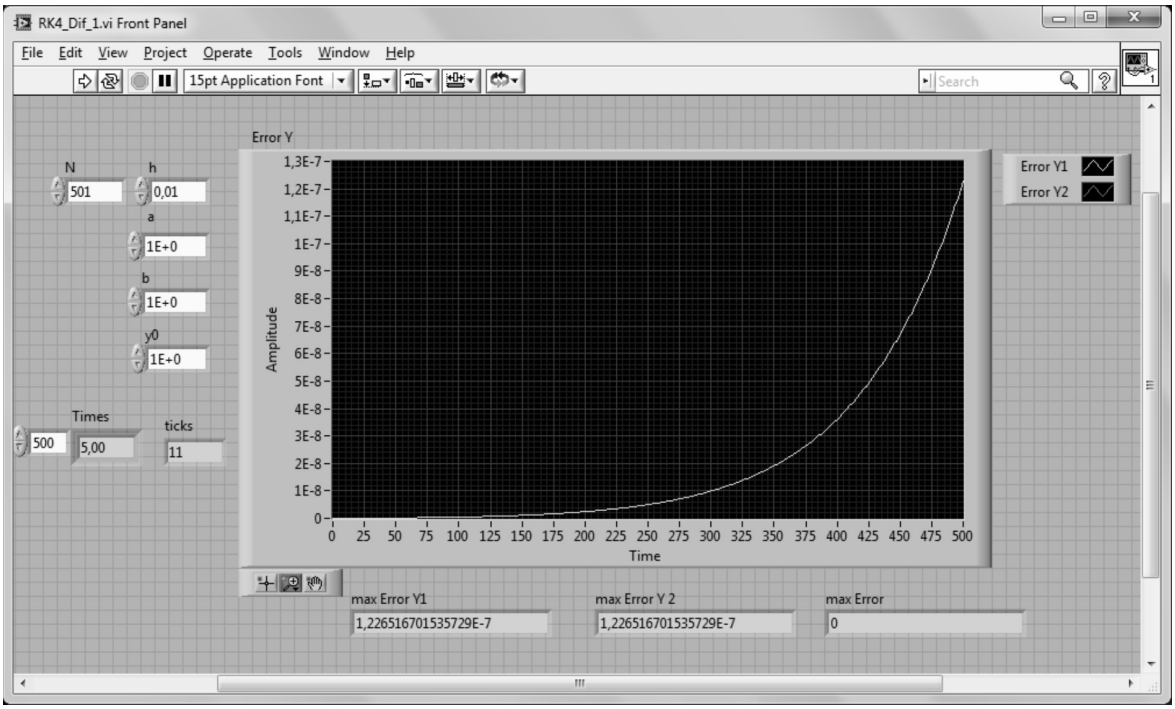


Рис. 8. Лицевая панель векторного решателя

0 < = t < = 5 не превосходят величины 1,226516701535729E-7.

Элементная база для реализации параллельного решателя

Придерживаясь классификации вычислительных средств для решения потовых задач и причисляя нахождение решений ОДУ к таким задачам, можно утверждать, что встроенный решатель LabVIEW имеет конвейерную структуру, а новый решатель – параллельную.

Для аппаратной реализации решателя наиболее подходят кристалы ПЛИС (FPGA) Virtex 5 фирмы Xilinx и Cyclone 4 фирмы Altera. ПЛИС предназначены для создания устройств цифровой обработки данных (DSP) с поддержкой выполнения векторных операций в форме с плавающей точкой (Floating Point IP Cores).

Доказана правильность алгоритма параллельных вычислений по формулам численного интегрирования ОДУ методом Рунге–Кутта.

Погрешности решений тестового уравнения на предложенном решателе и встроенном решателе LabVIEW совпадают.

Алгоритм применим к другим n-этапным методам Рунге–Кутта

Для эффективной аппаратной реализации предложенного решателя необходимо применять ПЛИС (FPGA) Virtex 5 или Cyclone 4 с поддержкой Floating Point IP Cores.

Время решения ОДУ на предложенном решателе в четыре раза меньше, чем на встроенном решателе LabVIEW (и Matlab).

Полученные результаты могут быть применены для разработки быстродействующих моделирующих и управляющих систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каляев, И.А.** Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры [Текст] / И.А. Каляев, И.И. Левин, Е.А. Семерников, [и др.]; 2-е изд. –Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2009. –С. 20–32.

2. **Эдвардс, Ч.Г.** Дифференциальные уравнения и краевые задачи: моделирование и вычисление помощью Mathematica, Maple и Matlab [Текст] / Ч.Г. Эдвардс, Д.Э. Пенни; Пер. с англ.; 3-е изд. –М.: ИД «Вильямс», 2009. –С. 203–217.

УДК 53.096,536.58

В.Н. Козлов С.В. Хлопин

РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИМИ ОБЪЕКТАМИ

Синтез управления нелинейными теплопроводящими объектами производится на основе решения нелинейных дифференциальных уравнений. Для численного решения кусочно-квадратичных и кусочно-линейных дифференциальных уравнений теплопроводности для трехмерного случая необходимо определить канонические формы трехмерных уравнений теплопроводности. Для трехмерного случая эти формы уравнений можно получить из обобщенного уравнения теплопроводности:

$$\varphi_1\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)=\varphi^x{}_2\left[\frac{\partial}{\partial x}\varphi^x{}_3\left(\varphi^x{}_4(u)\left(\frac{\partial}{\partial x}\varphi^x{}_5(u)\right)\right)\right]+$$
$$+\varphi^y{}_2\left[\frac{\partial}{\partial y}\varphi^y{}_3\left(\varphi^y{}_4(u)\left(\frac{\partial}{\partial y}\varphi^y{}_5(u)\right)\right)\right]+ \qquad (1)$$
$$+\varphi^z{}_2\left[\frac{\partial}{\partial z}\varphi^z{}_3\left(\varphi^z{}_4(u)\left(\frac{\partial}{\partial z}\varphi^z{}_5(u)\right)\right)\right]+f(x,y,z,t),$$
$$U(0,x,y,z)=U_0(x,y,z),\quad U\Big|_{(x,y,z)\in s}=U_S\,.$$

Это уравнение позволяет учесть изменения теплофизических свойств среды в виде кусочно-квадратичных функций (операторов) или их аппроксимаций (кусочно-линейных функций). Эти функции (операторы) позволяют учесть зависимость свойств теплопроводности от совокупности переменных: от первых производных температуры по времени $y=\varphi_1(z(t))$; вторых производных температуры от сложной координаты $y=\varphi_2(z(t))$; первых производных температуры от совокупности координат оператором $y=\varphi_3(z(t))$;

коэффициента теплопроводности от температуры $y = \varphi_4(z(t))$ или зависимости $y = \varphi_5(z(t))$.

Варианты различных форм кусочно-квадратичных уравнений теплопроводности можно получить путем рассмотрения частных случаев обобщенного уравнения теплопроводности для трехмерного случая (1).

Исходные и обобщенные уравнения приведены в табл. 1, где рассмотрены варианты уравнений и соответствующих начально-краевых задач.

Таблица 1

Основные задачи теплопроводности для трехмерного случая

1	Теплопроводность в изотропной среде $\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f(x,y,t),$ $0 < x < X, 0 < y < Y, 0 < z < Z, 0 < t < T,$ $u(x,y,z,0) = u_0(x,y,z),\ \ U\big\|_{(x,y,z)\in s} = U_S,$ $u(0,\ y,z,t) = u_1(t),\ u(X,y,z,f) = u_2(t),$ $u(x,0,\ z,f) = u_3(t), u(x,Y,z,\ f) = u_4(t),$ $u(x,y,\ 0,f) = u_5(t), u(x,y,Z,\ f) = u_6(t)$
2	Теплопроводность в среде с зависимым коэффициентом теплопроводности от температуры $\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\varphi^x{}_4(u)\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varphi^y{}_4(u)\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varphi^z{}_4(u)\frac{\partial u}{\partial y}\right) + f(x,y,t),$ $0 < x < X,\quad 0 < y < Y,\quad 0 < z < Z,\quad 0 < t < T,$ $u(x,y,z,0) = u_0(x,y,z),\quad U\big\|_{(x,y,z)\in s} = U_S,$ $u(0,\ y,z,t) = u_1(t),\ \ u(X,y,z,f) = u_2(t),$ $u(x,0,\ z,f) = u_3(t),\ \ u(x,Y,z,\ f) = u_4(t),$ $u(x,y,\ 0,f) = u_5(t),\ \ u(x,y,Z,\ f) = u_6(t)$
3	Среда с учетом коэффициента теплопроводности $\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\varphi^x{}_3\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\varphi^y{}_3\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\varphi^z{}_3\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) + f(x,y,t),$ $0 < x < X, 0 < y < Y, 0 < z < Z, 0 < t < T,$ $u(x,y,z,0) = u_0(x,y,z),\quad U\big\|_{(x,y,z)\in s} = U_S,$ $u(0,\ y,z,t) = u_1(t),\ \ u(X,y,z,f) = u_2(t),$ $u(x,0,\ z,f) = u_3(t),\ \ u(x,Y,z,\ f) = u_4(t),$ $u(x,y,\ 0,f) = u_5(t),\ \ u(x,y,Z,\ f) = u_6(t)$
4	Теплопроводность с учетом температуропроводности и коэффициента теплопроводности $\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\varphi^x{}_3\left(\varphi^x{}_4(u)\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\varphi^y{}_3\left(\varphi^y{}_4(u)\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\varphi^z{}_3\left(\varphi^z{}_4(u)\frac{\partial u}{\partial z}\right) + f(x,y,t),$ $0 < x < X, 0 < y < Y, 0 < z < Z, 0 < t < T,$ $u(x,y,z,0) = u_0(x,y,z),\quad U\big\|_{(x,y,z)\in s} = U_S,$ $u(0,\ y,z,t) = u_1(t),\ \ u(X,y,z,f) = u_2(t),$ $u(x,0,\ z,f) = u_3(t),\ \ u(x,Y,z,\ f) = u_4(t),$ $u(x,y,\ 0,f) = u_5(t),\ \ u(x,y,Z,\ f) = u_6(t)$

Рассмотренные задачи соответствуют различным нелинейным уравнениям теплопроводности, учитывающим различные типы нелинейных зависимостей координат и характеристик.

Для введенного множества моделей и задач распределенной теплопроводности можно построить классы явных и частично-неявных разностных схем для анализа динамики и синтеза управлений тепловыми процессами в специальных теплопроводящих средах для трехмерного случая.

Разностные схемы для трехмерных уравнений теплопроводности. Рассмотрим методику построения явных однородных разностных схем для уравнений табл. 1. Для этого в данных уравнениях теплопроводности необходимо перейти от операций дифференцирования к вычислению разностей по времени и пространственным аргументам.

Явные разностные схемы. Разностные схемы будут сформулированы для частных случаев уравнений типа (1).

1. Для линейного уравнения теплопроводности типа (1) табл. 1, можно сформулировать разностные соотношения на основе замены операций дифференцирования операциями вычисления разностей, которые примут вид:

$$\begin{gathered}
\Delta_\tau u^n_{m,k,r} = \frac{u^{n+1}_{m,k,r} - u^n_{m,k,r}}{\tau} = \\
= \Delta_x[\Delta_x u] + \Delta_y[\Delta_y u] + \Delta_z[\Delta_z u] + f^n_{m,k,r} = \\
= \Delta_x\left[\frac{u^n_{m+1,k,r} - u^n_{m,k,r}}{h_x}\right] + \Delta_y\left[\frac{u^n_{m,k+1,r} - u^n_{m,k,r}}{h_y}\right] + \\
+\Delta_z\left[\frac{u^n_{m,k,r+1} - u^n_{m,k,r}}{h_z}\right] + f^n_{m,k,r} = \\
= \frac{u^n_{m+2,k,r} - 2u^n_{m+1,k,r} + u^n_{m,k,r}}{h_x^{\,2}} + \\
+ \frac{u^n_{m,k+2,r} - 2u^n_{m,k+1,r} + u^n_{m,k,r}}{h_y^{\,2}} + \\
+ \frac{u^n_{m,k,r+2} - 2u^n_{m,k,r+1} + u^n_{m,k,r}}{h_z^{\,2}} + f^n_{m,k,r}, \\
m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., \\
..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1.
\end{gathered} \tag{2}$$

На основании (2) можно сформулировать разностный оператор:

$$L^1_h(u^{(h)}) = \begin{cases} \dfrac{u^{n+1}_{m,k,r} - u^n_{m,k,r}}{\tau} - \\ -\dfrac{u^n_{m+2,k,r} - 2u^n_{m+1,k,r} + u^n_{m,k,r}}{h_x^{\,2}} - \\ -\dfrac{u^n_{m,k+2,r} - 2u^n_{m,k+1,r} + u^n_{m,k,r}}{h_y^{\,2}} - \\ \dfrac{u^n_{m,k,r+2} - 2u^n_{m,k,r+1} + u^n_{m,k,r}}{h_z^{\,2}} = \\ = f\,(x_m, y_k, z_r, t_n), \\ u^0_{m,k,r} = \psi_{m,k,r}, \end{cases}$$

$$\begin{gathered}
m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., \\
..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1.
\end{gathered}$$

Последний оператор определяет явную линейную разностную схему для трехмерных уравнений теплопроводности:

$$\begin{gathered}
u^{n+1}_{m,k,r} = u^n_{m,k,r} + \frac{\tau}{h_x^{\,2}}(u^n_{m+2,k,r} - 2u^n_{m+1,k,r} + u^n_{m,k,r}) + \\
+\frac{\tau}{h_y^{\,2}}(u^n_{m,k+2,r} - 2u^n_{m,k+1,r} + u^n_{m,k,r}) + \\
+\frac{\tau}{h_z^{\,2}}(u^n_{m,k,r+2} - 2u^n_{m,k,r+1} + u^n_{m,k,r}) + \tau f^n_{m,k,r}, \\
m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., \\
..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1.
\end{gathered} \tag{3}$$

Разностные схемы (3) могут использоваться для анализа и синтеза управлений тепловыми процессами.

2. Для уравнений (2) табл. 1 можно получить разностные схемы на основе замены операций дифференцирования операциями вычисления разделенных разностей и применением леммы о вычислении разности произведения функций [1]. Это приводит к разностным соотношениям:

$$\begin{gathered}
\Delta_\tau u^n_{m,k,r} = \frac{u^{n+1}_{m,k,r} - u^n_{m,k,r}}{\tau} = \Delta_x\left[\varphi^x{}_4(u)\Delta_x u^n_{m,k,r}\right] + \\
+\Delta_y\left[\varphi^y{}_4(u)\Delta_y u^n_{m,k,r}\right] + \Delta_z\left[\varphi^z{}_4(u)\Delta_z u^n_{m,k,r}\right] + \\
+ f^n_{m,k,r} = \Delta_x\left[\varphi^x{}_4(u)\frac{u^n_{m+1,k,r} - u^n_{m,k,r}}{h_x}\right] + \\
+\Delta_y\left[\varphi^y{}_4(u)\frac{u^n_{m,k+1,r} - u^n_{m,k,r}}{h_y}\right] +
\end{gathered}$$

$$+\Delta_z\left[\varphi^z{}_4(u)\frac{u^n_{m,k,r+1}-u^n_{m,k,r}}{h_z}\right]+f^n_{m,k,r}=$$

$$=\varphi^x{}_4(u)\frac{u^n_{m+2,k,r}-2u^n_{m+1,k,r}+u^n_{m,k,r}}{h_x{}^2}+$$

$$+\varphi^y{}_4(u)\frac{u^n_{m,k+2,r}-2u^n_{m,k+1,r}+u^n_{m,k,r}}{h_y{}^2}+$$

$$+\varphi^z{}_4(u)\frac{u^n_{m,k,r+2}-2u^n_{m,k,r+1}+u^n_{m,k,r}}{h_z{}^2}+f^n_{m,k,r},$$

$$m=0,\pm1,\pm2,...,k=0,\pm1,\pm2,...,$$
$$...,r=0,\pm1,\pm2,...,n=0,1,...,N-1.$$

На основании разностных соотношений можно сформулировать разностный оператор, характер нелинейности которого определяется использованием кусочно-квадратичных или кусочно-линейных операторов для характеристики свойств теплопроводности.

Этот разностный оператор может быть представлен в следующей форме:

$$L^1_h(u^{(h)})=\begin{cases}\dfrac{u^{n+1}_{m,k,r}-u^n_{m,k,r}}{\tau}-\\ -\varphi^x{}_4(u)\dfrac{u^n_{m+2,k,r}-2u^n_{m+1,k,r}+u^n_{m,k,r}}{h_x{}^2}-\\ -\varphi^y{}_4(u)\dfrac{u^n_{m,k+2,r}-2u^n_{m,k+1,r}+u^n_{m,k,r}}{h_y{}^2}-\\ -\varphi^z{}_4(u)\dfrac{u^n_{m,k,r+2}-2u^n_{m,k,r+1}+u^n_{m,k,r}}{h_z{}^2}=\\ =f(x_m,y_k,z_r,t_n),\ \ u^0_{m,k,r}=\psi_{m,k,r},\end{cases}\qquad(4)$$

$$m=0,\pm1,\pm2,...,k=0,\pm1,\pm2,...,$$
$$...,r=0,\pm1,\pm2,...,n=0,1,...,N-1.$$

Разностному оператору (4) (уравнение типа (2) табл. 1) соответствует явная кусочно-квадратичная или кусочно-линейная разностная схема для трехмерных уравнений теплопроводности, которая определяется следующим образом:

$$u^{n+1}_{m,k,r}=u^n_{m,k,r}+\frac{\tau\cdot\varphi^x{}_4(u)}{h_x{}^2}(u^n_{m+2,k,r}-2u^n_{m+1,k,r}+u^n_{m,k,r})+$$

$$+\frac{\tau\cdot\varphi^y{}_4(u)}{h_y{}^2}(u^n_{m,k+2,r}-2u^n_{m,k+1,r}+u^n_{m,k,r})+$$

$$+\frac{\tau\cdot\varphi^z{}_4(u)}{h_z{}^2}(u^n_{m,k,r+2}-2u^n_{m,k,r+1}+u^n_{m,k,r})+f^n_{m,k,r},$$

3. Для уравнения типа (3) табл. 1 разностные соотношения принимают следующую форму:

$$\frac{u^{n+1}_{m,k,r}-u^n_{m,k,r}}{\tau}=\Delta_x\varphi^x{}_3(\Delta_x u^n_{m,k,r})+$$
$$+\Delta_y\varphi^y{}_3(\Delta_y u^n_{m,k,r})+$$
$$+\Delta_z\varphi^z{}_3(\Delta_z u^n_{m,k,r})+f^n_{m,k,r}=$$
$$=\Delta_x\left[\frac{\varphi^x{}_3(u^n_{m+1,k,r})-\varphi^x{}_3(u^n_{m,k,r})}{h_x}\right]+$$
$$+\Delta_y\left[\frac{\varphi^y{}_3(u^n_{m,k+1,r})-\varphi^y{}_3(u^n_{m,k,r})}{h_y}\right]+\qquad(5)$$
$$+\Delta_z\left[\frac{\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r+1})-\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r})}{h_z}\right]+$$
$$+f^n_{m,k,r}=[\varphi^x{}_3(u^n_{m+2,k,r})-2\varphi^x{}_3(u^n_{m+1,k,r})+$$
$$+\varphi^x{}_3(u^n_{m,k,r})]/h_x^2+[\varphi^y{}_3(u^n_{m,k+2,r})-$$
$$-2\varphi^y{}_3(u^n_{m,k+1,r})+\varphi^y{}_3(u^n_{m,k,r})]/h_y^2+$$
$$+[\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r+2})-2\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r+1})+$$
$$+\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r})]/h_z^2+f^n_{m,k,r},$$
$$m=0,\pm1,\pm2,...,k=0,\pm1,\pm2,...,$$
$$...,r=0,\pm1,\pm2,...,n=0,1,...,N-1.$$

На основании разностной схемы (5) можно сформулировать разностный оператор, характер нелинейности которого определяется использованием кусочно-квадратичных или кусочно-линейных операторов для характеристики свойств теплопроводности.

Этот разностный оператор может быть представлен в следующей форме:

$$L^1_h(u^{(h)})=$$
$$=\begin{cases}\dfrac{u^{n+1}_{m,k,r}-u^n_{m,k,r}}{\tau}-\\ -\dfrac{\varphi^x{}_3(u^n_{m+2,k,r})-2\varphi^x{}_3(u^n_{m+1,k,r})+\varphi^x{}_3(u^n_{m,k,r})}{h_x{}^2}-\\ -\dfrac{\varphi^y{}_3(u^n_{m,k+2,r})-2\varphi^y{}_3(u^n_{m,k+1,r})+\varphi^y{}_3(u^n_{m,k,r})}{h_y{}^2}-\\ -\dfrac{\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r+2})-2\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r+1})+\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r})}{h_z{}^2}=\\ =f(x_m,y_k,z_r,t_n),\ \ u^0_{m,k,r}=\psi_{m,k,r},\end{cases}\qquad(6)$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ...,$$
$$..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1.$$

Разностному оператору (6) соответствует явная кусочно-квадратичная или кусочно-линейная разностная схема (в зависимости от типа оператора), которая имеет следующее представление:

$$\begin{gathered} u^{n+1}_{m,k,r} = u^n_{m,k,r} + \tau[\varphi^x{}_3(u^n_{m+2,k,r}) - \\ -2\varphi^x{}_3(u^n_{m+1,k,r}) + \varphi^x{}_3(u^n_{m,k,r})] / h^2_x + \\ +\tau[\varphi^y{}_3(u^n_{m,k+2,r}) - 2\varphi^y{}_3(u^n_{m,k+1,r}) + \\ +\varphi^y{}_3(u^n_{m,k,r})] / h^2_y + \tau[\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r+2}) - \\ -2\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r+1}) + \varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r})] / h^2_z + \tau f^n_{m,k,r}, \\ m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., \\ ..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1. \end{gathered} \tag{7}$$

4. Для уравнений, соответствующих трехмерным моделям теплопроводности типа (4) табл. 1, разностные соотношения могут формироваться путем дискретизации по времени и по трем пространственным переменным. При этом возможен учет различных областей изменения свойств нелинейной теплопроводности.

В простейших случаях, когда изменение свойств теплопроводности происходит по «прямоугольным сечениям» (параллельно основным осям координат), соответствующие разностные схемы принимают следующий вид:

$$\begin{gathered} \frac{u^{n+1}_{m,k,r} - u^n_{m,k,r}}{\tau} = \Delta_x \varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(\Delta_x u^n{}_{m,k,r})] + \\ +\Delta_y \varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(\Delta_y u^n{}_{m,k,r})] + \\ +\Delta_z \varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(\Delta_z u^n{}_{m,k,r})] + f^n_{m,k,r} = \\ = \Delta_x \left[\frac{\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m+1,k,r})] - \varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m,k,r})]}{h_x} \right] + \\ +\Delta_y \left[\frac{\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k+1,r})] - \varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k,r})]}{h_y} \right] + \\ +\Delta_z \left[\frac{\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r+1})] - \varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r})]}{h_z} \right] + f^n_{m,k,r} = \\ = (\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m+2,k,r})] - 2\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m+1,k,r})] + \\ +\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) / h^2{}_x + \\ +(\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k+2,r})] - 2\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k+1,r})] + \\ +\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) / h^2{}_y + \\ +(\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r+2})] - 2\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r+1})] + \\ +\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) / h^2{}_z + f^n_{m,k,r}, \\ m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., \\ ..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1. \end{gathered} \tag{8}$$

На основании (8) можно сформулировать разностный оператор:

$$L^1_h(u^{(h)}) = \begin{cases} \dfrac{u^{n+1}_{m,k,r} - u^n_{m,k,r}}{\tau} - \\ -(\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m+2,k,r})] - \\ -2\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m+1,k,r})] + \\ +\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) / h^2{}_x - \\ -(\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k+2,r})] - \\ -2\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k+1,r})] + \\ +\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) / h^2{}_y - \\ -(\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r+2})] - \\ -2\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r+1})] + \\ +\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) / h^2{}_z = \\ = f^n_{m,k,r}, \\ u^0_{m,k} = \psi_{m,k}, \end{cases} \tag{9}$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ...,$$
$$..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1.$$

Разностный оператор (9) позволяет получить явную кусочно-квадратичную или кусочно-линейную разностную схему для трехмерных уравнений теплопроводности типа (4) табл. 1. В результате соответствующая разностная схема, адекватная уравнению (4), принимает следующий вид:

$$\begin{gathered} u^{n+1}_{m,k,r} = u^n_{m,k,r} + \frac{\tau}{h^2{}_x}(\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m+2,k,r})] - \\ -2\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m+1,k,r})] + \varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m,k,r})] + \\ +\frac{\tau}{h^2{}_y}(\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k+2,r})] - 2\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k+1,r})] + \\ +\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) + \frac{\tau}{h^2{}_z}(\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r+2})] - \\ -2\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r+1})] + \varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) + \\ +\tau f\,(x_m, y_k, z_{r,} t_n), \\ m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., \\ ..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1. \end{gathered} \tag{10}$$

Таблица 2

Явные разностные схемы для основных задач теплопроводности для трехмерного случая

$u^{n+1}_{m,k,r} = u^n_{m,k,r} + \frac{\tau}{h_x^2}(u^n_{m+2,k,r} - 2u^n_{m+1,k,r} + u^n_{m,k,r}) + \frac{\tau}{h_y^2}(u^n_{m,k+2,r} - 2u^n_{m,k+1,r} + u^n_{m,k,r}) + \frac{\tau}{h_z^2}(u^n_{m,k,r+2} - 2u^n_{m,k,r+1} + u^n_{m,k,r}) + \tau f^n_{m,k,r}$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1$	(3)
$u^{n+1}_{m,k,r} = u^n_{m,k,r} + \frac{\tau \cdot \varphi^x{}_4(u)}{h_x^2}(u^n_{m+2,k,r} - 2u^n_{m+1,k,r} + u^n_{m,k,r}) + \frac{\tau \cdot \varphi^y{}_4(u)}{h_y^2}(u^n_{m,k+2,r} - 2u^n_{m,k+1,r} + u^n_{m,k,r}) + \frac{\tau \cdot \varphi^z{}_4(u)}{h_z^2}(u^n_{m,k,r+2} - 2u^n_{m,k,r+1} + u^n_{m,k,r}) + f^n_{m,k,r}$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1$	(4)
$u^{n+1}_{m,k,r} = u^n_{m,k,r} + \tau[\varphi^x{}_3(u^n_{m+2,k,r}) - 2\varphi^x{}_3(u^n_{m+1,k,r}) + \varphi^x{}_3(u^n_{m,k,r})] / h_x^2 + \tau[\varphi^y{}_3(u^n_{m,k+2,r}) - 2\varphi^y{}_3(u^n_{m,k+1,r}) + \varphi^y{}_3(u^n_{m,k,r})] / h_y^2 + \tau[\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r+2}) - 2\varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r+1}) + \varphi^z{}_3(u^n_{m,k,r})] / h_z^2 + \tau f^n_{m,k,r}$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1$	(7)
$u^{n+1}_{m,k,r} = u^n_{m,k,r} + \frac{\tau}{h^2_x}(\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m+2,k,r})] - 2\varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m+1,k,r})] + \varphi^x{}_3[\varphi^x{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) + \frac{\tau}{h^2_y}(\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k+2,r})] - 2\varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k+1,r})] + \varphi^y{}_3[\varphi^y{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) + \frac{\tau}{h^2_z}(\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r+2})] - 2\varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r+1})] + \varphi^z{}_3[\varphi^z{}_4(u^n{}_{m,k,r})]) + \tau f(x_m, y_k, z_r, t_n)$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, ..., k = 0, \pm 1, \pm 2, ..., r = 0, \pm 1, \pm 2, ..., n = 0, 1, ..., N-1$	(10)

Полученная разностная схема имеет характерную структуру, определяемую типом используемого нелинейного оператора.

Можно составить системную матрицу явных разностных схем для трехмерных кусочно-квадратичных уравнений теплопроводности, частных случаев уравнения теплопроводности для трехмерного случая (1).

Варианты явных разностных схем, полученные для рассмотренных трехмерных уравнений теплопроводности, приведены в табл. 2.

Полученные разностные схемы могут использоваться для анализа процессов распространения тепла на основе решения задач Коши в полубесконечных средах, когда отсутствуют обратные процессы от отражения тепла от края границы исследуемого объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козлов, В.Н.** Обобщенные модели и разностные схемы теплопроводности [Текст] / В.Н. Козлов, С.В. Хлопин. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. –157 с.

2. **Козлов, В.Н.** Обобщенные модели и разностные схемы теплопроводности [Текст] / В.Н. Козлов, С.В. Хлопин // Управление энергетическими системами; Ч. 4. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. –136 с.

3. **Козлов, В.Н.** Нелинейные модели и разностные задачи теплопроводности [Текст] / В.Н. Козлов, К.А. Магомедов, С.В. Хлопин. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. –290 с.

4. **Козлов, В.Н.** Негладкие операторы и распределенные системы. Модели теплопроводности [Текст] / В.Н. Козлов, К.А. Магомедов. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. –196 с.

УДК 519.866

А.В. Медведев, П.Н. Победаш

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Развитие современных производственных экономических систем (ЭС) на микро-, мезо-, макро- либо даже на мегаэкономическом уровнях (т. е. на уровне отдельного предприятия, отрасли, региона, страны или планеты в целом) определяется множеством факторов – уровнем инфляции, конъюнктурой спроса и предложения на производимую продукцию, ее стоимостью, производительностью основных производственных фондов (ОПФ) и др. Поэтому лицу, принимающему решение (ЛПР), как правило, сложно оценить последствия того или иного инвестиционного решения без использования математических методов анализа. При этом особенно важен этап предварительной оценки инвестиционных проектов (ИП), необходимый для определения в первом приближении требуемых для его реализации инвестиционных ресурсов и эффективности проекта. Это объясняется тем, что принятие неэффективного проекта влечет за собой убытки или «замораживание» средств, которые можно использовать в более доходных ИП. В этой связи актуальна задача разработки единой методологии предварительной оценки проектов реального инвестирования (инвестирования в ОПФ). При этом в ЭС уменьшение стоимости большинства активов с течением времени в силу физического или морального износа учитывается путем дисконтирования по ставке, учитывающей требования доходности инвестора и различные риски ИП.

В данной статье предлагается операционный подход к анализу инвестиционных проектов развития ЭС, описываемых в классе многокритериальных многошаговых задач линейного программирования (ММЗЛП), основанный на применении к ограничениям этих задач оператора, являющегося аналогом z-преобразования на конечном интервале времени, для построения и анализа задач меньшей размерности.

Далее приведены основные принципы и структурные элементы моделей, используемые на стадии предынвестиционной оценки эффективности ЭС:

1) основной критерий эффективности функционирования ЭС – чистая дисконтированная стоимость (NPV) средств ЛПР (производителя, потребителя, управляющего центра и т. п.). $\mathrm{NPV}_l = \sum_{t=0}^{T} \frac{\text{ДП}_l(t)}{(1+r)^t}$ $(l = 1, ..., N)$, где $\text{ДП}_l(t)$ – денежные потоки l-го ЛПР в момент t, r – ставка дисконтирования;

2) общее уравнение баланса текущих денежных средств l-го ЛПР $Ds_l(t)$ $(l = 1, \ldots, N)$ в момент t, участвующих в любом ИП, формально имеет вид $Ds_l(t+1) = Ds_l(t) + Ps_l(t+1) - Pl_l(t+1)(t = 0, ..., T-1)$, где $Ps_l(t+1), Pl_l(t+1)$ – соответственно поступления и платежи l-го ЛПР, T – срок действия ИП, N – количество ЛПР;

3) текущие денежные средства любого ЛПР неотрицательны в течение всего периода действия ИП: $Ds_l(t) \geq 0$ $(t = 1, ..., T;\ l = 1, ..., N)$, что является обязательным условием реализуемости проекта;

4) выручка от реализации продукции $R_k(t)$ k-го вида производственной деятельности ЭС удовлетворяет ограничениям $R_k(t) \leq \min(q_k(t), E_k(t))$ $(k = 1, ..., n)$, где $q_k(t)$ и $E_k(t)$ – соответственно спрос на продукцию k-го вида и максимальный объем произведенной продукции k-го вида в стоимостном выражении в момент t, определяемый уровнем научно-технического прогресса;

5) риски учитываются по формуле $r_i = r + i$, где r_i, r, i – соответственно ставки дисконтирования с учетом и без учета риска и уровень инфляции;

6) из п. 1–5 и линейного алгоритма расчета доходов и расходов ЛПР при абстрагировании от несущественных для предварительного анализа бухгалтерских и финансовых деталей следует линейность модели [1];

7) многокритериальность модели учитывает взаимосвязь интересов всех ЛПР.

С учетом представленных принципов и структурных элементов моделей функционирование широкого класса ЭС, исследованных в работах [2–4 и др.], можно описать в виде следующей ММЗЛП:

$$x_i(t+1)=\sum_{j=1}^{n}a_{ij}(t)x_j(t)+\sum_{l=1}^{r_t}b_{il}(t)u_l(t)-s_i(t),$$
$$x_i(0)=a_i(t),\ x_i(T)=x_i^T\ (i=1,\ ...,\ n); \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{n}c_{kj}(t)x_j(t)+\sum_{l=1}^{r_t}d_{kl}(t)u_l(t)\le h_k(t)\,(k=1,\ ...,\ m_t),$$
$$u_l(t)\ge 0\,(l=r_t^1+1,\ ...,\ r_t;\ t=0,\ ...,\ T-1); \quad (2)$$

$$\overline{J}=\{J^1,\ ...,\ J^N\}\to\max, \quad (3)$$

где $J^\nu=\sum_{t=0}^{T-1}[(a^\nu(t),x(t))+(b^\nu(t),u(t))]+(a^\nu(T),x(T))$ – ν-й целевой критерий; $u(t)=[u_l(t)]\in R^{r_t}$, $x(t)=[x_i(t)]\in R^n$ – управляющий и фазовый векторы соответственно; $a=[a_i]\in R^n$; $s(t)=[s_i(t)]\in R^n$; $h(t)=[h_k(t)]\in R^{m_t}$; $a^\nu(t)=[a^\nu(t)]\in R^n$; $b^\nu(t)=[b^\nu(t)]\in R^{r_t}$ – векторы задачи (1)–(3); $t=0,\ ...,\ T$; $i,\ j=1,\ ...,\ n$; $l=1,\ ...,\ r_t$; $k=1,\ \dots,\ m_t$; $\nu=1,\ \dots,\ N$ – номер критерия; r_t, r_t^1, m_t, T, N – размерность вектора $u(t)$ и его неограниченной по знаку части, число ограничений и шагов и количество критериев соответственно; $(a^\nu(t),x(t));(b^\nu(t),u(t))$ – скалярные произведения векторов $a^\nu(t)$ и $x(t)$, а также $b^\nu(t)$ и $u(t)$ соответственно.

Согласно [5], задача (1)–(3) эквивалентна однокритериальной задаче (1), (2) с максимизацией целевой функции в виде свертки критериев:

$$J(\mu)=\sum_{\nu=1}^{N}\mu_\nu J^\nu\to\max, \quad (4)$$

где вектор параметров $\mu\in \mathrm{M}=\left\{(\mu_1,\ ...,\ \mu_N)\in E^N:\ \mu_\nu>0\,(\nu=1,\ ...,\ N);\sum_{\nu=1}^{N}\mu_\nu=1\right\}$.

Покажем применение операционного подхода на примере, когда

$$a_{ij}(t)=a_{ij}=\mathrm{const};\ c_{kj}(t)=c_{kj}=\mathrm{const};$$
$$r_t^1=0\,(t=0,\ ...,\ T-1);$$
$$a^\nu(t)=\frac{1}{(1+r)^t}\overline{a}^\nu\in R^n\,(t=0,\ ...,\ T-1;\ \nu=1,\ ...,\ N-1);\ a^\nu(T)=(0,\ ...,\ 0)\in R^n, \quad (5)$$

где вектор $\overline{a}^\nu=\mathrm{const}\in R^n\,(\nu=1,\ ...,\ N-1)$. Последнее из условий (5) выполнено, т. к. слагаемое $(a^\nu(T),x(T))=\sum_{i=1}^{n}a_i^\nu(T)x_i^T=\mathrm{const}$ в выражении J^ν не меняет оптимума в пространстве переменных. Применяя при $z=1+r$ к уравнениям задачи (1), (2), (4) оператор Z_T вида:

$$Z_T(x(t))\overset{\mathrm{def}}{=}X(z,T)=\sum_{t=0}^{T-1}x(t)z^{-t}\ (z\ne 0), \quad (6)$$

являющийся аналогом z-преобразования для конечного T, в силу свойства

$$Z_T(x(t+1))=z[X(z,T)+x(T)z^{-T}-x(0)], \quad (7)$$

получим операторные уравнения:

$$z[X_i(z,T)+x_i^Tz^{-T}-a_i]=\sum_{j=1}^{n}a_{ij}X_j(z,T)+$$
$$+\sum_{t=0}^{T-1}\left(\sum_{l=1}^{r_t}b_{il}(t)u_l(t)-s_l(t)\right)z^{-t}\ (i=1,\ ...,\ n). \quad (8)$$

Аналогично применяя оператор (6) к неравенствам (2), получим более простые (агрегированные) ограничения, чем соотношения (2). При этом в силу структуры коэффициентов $a^\nu(t)\in R^n\,(t=0,\ ...,\ T-1;\nu=1,\ ...,\ N-1)$ (см. (5)), критерии выражаются через линейную комбинацию изображений $X_i(z,T)\,(i=1,\ ...,\ n)$. Полученную задачу назовем Z_T-*задачей*, соответствующей исходной ММЗЛП (1)–(3). Примеры таких Z_T-задач приведены в публикациях [3, 6]. Подход, основанный на применении оператора (6) к линейной задаче (1), (2), (4) для построения и анализа Z_T-задачи меньшей размерности, назовем *операционным подходом*.

При $T\to+\infty$ из формулы (6) имеем $\lim_{T\to+\infty}Z_T(x(t))\overset{\mathrm{def}}{=}Z(x(t))\overset{\mathrm{def}}{=}X(z)=\sum_{t=0}^{\infty}x(t)z^{-t}\,(z>1)$, причем для сходимости последнего ряда достаточно ограниченности последовательности $\{x(t)\}\,(t=0,\ 1,\ ...)$ и условия $z>1$. Так как указанный ряд сходится, а, значит, по необходимому признаку сходимости $\lim_{t\to+\infty}x(t)z^{-t}=0$, и, в частности,

$$\lim_{T\to+\infty}x(T)z^{-T}=0, \quad (9)$$

то (7) примет вид $Z(x(t+1))=z[X(z)-x(0)]$.

При $T \to +\infty$ из Z_T-задачи, в силу (9), получим более простую ЗЛП, которую назовем *Z-задачей* (см. [1]).

Следует отметить, что в модели из работы [4], в отличие от остальных указанных моделей, имеются критерии без дисконтирования:

$$J = \sum_{j=1}^{n} \alpha_j x_j(T) \to \max , \qquad (10)$$

которые с учетом предельного соотношения из [7] $\lim\limits_{t\to+\infty} x(t) = \lim\limits_{z\to 1}(z-1)X(z)$, при $T \to +\infty$ представим в форме

$$J = \lim_{z\to 1+0}(z-1)\sum_{j=1}^{n} \alpha_j X_j(z) \to \max . \qquad (11)$$

Заметим, что критерий общего вида $J = \sum\limits_{t=0}^{T-1}[(a(t),x(t)) + (b(t),u(t))] + (a(T),x(T))$ несложно представить в форме (10) с помощью дополнительной фазовой переменной $y(t)$, удовлетворяющей уравнению движения $y(t+1) = y(t) + (a(t),x(t)) + (b(t),u(t))\,(t = 0,...,T-1)$, $y(0) = 0$. Тогда условие $J \to \max$ равносильно $y(T) \to \max$.

Наличие критериев вида (11) приводит к ЗЛП, в которой помимо z-изображений $U_{K+k}(z) \overset{\text{def}}{=} \sum\limits_{t=0}^{\infty} u_{K+k}(t) z^{-t}$ $(k = 1, ..., K)$, фигурирует сходящийся ряд $U_{K+k}(1) \overset{\text{def}}{=} \sum\limits_{t=0}^{\infty} u_{K+k}(t)$ $(k = 1, ..., K)$. Поэтому назовем ее $(z,1)$-*моделью*, соответствующей исходной ММЗЛП. Если не доказана сходимость этого ряда, то целесообразно заменить его на ряд более общего вида $U_{K+k}(z_0) \overset{\text{def}}{=} \sum\limits_{t=0}^{\infty} u_{K+k}(t) z_0^{-t}$ $(k = 1, ..., K)$, где $z_0 \to 1+0$, используя для численного анализа эффективности ИП развития ЭС авторский пакет программ [8]. Задачу, полученную такой заменой, назовем (z,z_0)-*задачей*.

Анализ Z_T-задачи (Z-задачи или $(z,1)$-задачи), после выражения изображений $X_i(z,T)$ $(i = 1, ..., n)$ из уравнений (8), с учетом (4) позволяет для ММЗЛП (1)–(3) на конечном (либо бесконечном) интервале получать широкий спектр результатов: доказывать существование решения; получать аналитические оценки на значения управляющих переменных и критериев; находить достаточные условия неэффективности ИП развития ЭС на этапе их предварительной многокритериальной оценки.

В статье рассмотрены основные этапы операционного подхода для анализа ИП развития ЭС, описываемых ММЗЛП, предложено его расширение при наличии критериев без дисконтирования. Подход позволяет доказывать разрешимость данных задач, получать оценки на управления и критерии, достаточные условия неэффективности этих ИП.

Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы». НИР 2.1.1/2710.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Медведев, А.В.** Применение z-преобразования к исследованию многокритериальных линейных моделей регионального экономического развития [Текст] / А.В. Медведев. –Красноярск: Изд-во Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та, 2008. –228 с.

2. **Победаш, П.Н.** Анализ двухкритериальной модели оптимального управления реальными инвестициями с неопределенным спросом [Текст] / П.Н. Победаш // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2009. –№ 5 (86). –С. 114–119.

3. **Победаш, П.Н.** Анализ модели оптимального управления реальными инвестициями на основе операционного подхода [Текст] / П.Н. Победаш // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2009. – № 6 (91). –С. 75–81.

4. **Медведев, А.В.** Математическая модель глобального социально-экономического развития [Текст] / А.В. Медведев, Е.С. Семенкин, П.Н. Победаш // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та. –2010. –Вып. 5 (31). –С. 137–142.

5. **Штойер, Р.** Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления, приложения / Р. Штойер. –М.: Наука, 1982. – 600 с.

6. **Победаш, П.Н.** Анализ модели инновационного развития производственного предприятия на основе операционного подхода [Текст] / П.Н. Победаш // Научно-технические ведомости Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. – № 5 (108). –С. 71–74.

7. **Мартыненко, В.С.** Операционное исчисление [Текст] / В.С. Мартыненко. – К.: Выща шк., 1990. –359 с.

8. **Медведев, А.В.** Конструктор и решатель дискретных задач оптимального управления («Карма») [Текст] / А.В. Медведев, П.Н. Победаш, А.В. Смольянинов, М.А. Горбунов // Св-во Роспатента № 2008614387 от 11.09.2008.

УДК 331

В.А. Пархоменко, К.В. Швецов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Понятие «социотехнические системы» (СТС), впервые предложенное Э. Тристом и К. Бамфортом еще в 60-х гг. XX в. [2], является актуальным и в наши дни [12, 15]. Ряд ученых, на наш взгляд, справедливо считает термины «СТС» и «социально-экономические системы» равнозначными [1]. «СТС» является в некоторых контекстах применения более приемлемым термином, нежели синонимичный термин «организация». «Организация» – слово-омоним, что влечет за собой семантические проблемы восприятия и толкования: организация как процесс человеческой деятельности и как структурное, взаимосвязанное образование людей, технических комплексов и технологий.

Однако в организациях управление людьми называют *управлением персоналом* (подразумеваются штатные и внештатные работники), кадрами (синоним – «кадровые ресурсы», только штатные работники), *человеческими ресурсами* (в рамках современной парадигмы управления – это как работники и руководители СТС, так и соискатели на рабочие места, проходящие процедуры трудоустройства), а в СТС – чаще называют *управлением агентами*, *активными элементами* (АЭ), *составом элементов* [3, 4]. Элементы «активны» потому, что творческое начало человека и свобода выбора подчеркивают основное их отличие от технических элементов СТС. Например, человек проявляет отрицательную активность, когда саботирует работу, и положительную активность, когда работает сверх нормы. В качестве синонима *фактора активности* иногда используют выражение «человеческий фактор».

Нейтральными терминами, используемыми для пояснения перечисленных выше, являются: *коллектив*, *работники*, *сотрудники*, *служащие*, *рабочая сила*, *людские ресурсы*. «Трудовые ресурсы» используют среди прочих экономических категорий оценки отрасли, региона и страны и подразумевают население, обладающее физическими и интеллектуальными способностями к трудовой деятельности. Иными словами, это работающая и неработающая, но трудоспособная часть населения [14].

Роль и место задачи оценки активных элементов

Управление АЭ призвано обеспечить СТС высококвалифицированными сотрудниками, становящимися главным ее конкурентным преимуществом [4]. Оценка состояния АЭ – основная задача управления человеческими ресурсами (ЧР) организации.

Необходимость оценки АЭ возникает при выполнении большинства задач управления ЧР. Контекст оценки АЭ накладывает специфику на проектирование соответствующих методик и программного обеспечения (ПО). Стандартный набор задач, решаемых с помощью механизмов управления кадрами, сформулированный уже к 70-м гг. XX в., остается актуальным и в парадигме управления ЧР и включает в себя [2]:

1) комплектование штата организации – набор кандидатов и отбор из их числа лиц, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым руководством фирмы к будущим сотрудникам;

2) повышение квалификации персонала (прим. авт. – в современной практике задача включается в развитие персонала);

3) распределение кадровых ресурсов – расстановка кадров и назначение на должности (*прим. авт.* – к 70-м гг. XX в. задачи распределения и использования трудовых ресурсов считали «зеркальными» по отношению друг к другу: в первом случае фиксируется расписание работ, а во втором – штат сотрудников; на практике обе задачи невозможно решить одновременно [6]);

4) использование кадровых ресурсов – разработка организационной структуры, информационных потоков и схем взаимоотношений между сотрудниками, стиля руководства, инструкций по выполнению работ (*прим. авт.* – в современной практике задача входит в такие направления, как организационное проектирование, макроэргономика);

5) оценка эффективности работы персонала – измерение вклада каждого сотрудника в успешную деятельность организации;

6) оплата и стимулирование персонала – использование различных форм вознаграждения и поощрения для стимулирования каждого сотрудника (*прим. авт.* – актуальным названием является *стимулирование* и *мотивация персонала*).

К задачам управления АЭ, отвечающим требованиям современного практического и теоретического управления, относят также получение обратной связи об организации (в частности, о процедурах профотбора кандидатов и аттестации сотрудников), формирование резерва, адаптацию, профориентацию, развитие, ротацию ЧР, оценку человеческого (трудового, кадрового) потенциала и капитала, формирование политики управления ЧР, аттестацию рабочих мест на требования техники безопасности и на уровень благоприятности условий труда, прогнозирование потребности в сотрудниках.

Помимо оценки АЭ существует еще одна важная задача в управлении – самооценка АЭ, в частности, самооценка соискателей на вакантные места и работников организации. Эксперты в области управления ЧР и врачи-психологи считают, что оценка человеком самого себя способствует личностному росту, повышению мотивации и удовлетворенностью результатами труда. Широкое распространение получил подход, при котором самооценка субъектов включается в задачу оценки АЭ.

Некоторые работодатели следят также и за психофизиологическим состоянием человека, особенно работающего в экстремальных условиях труда, проводят диагностику и своевременные психокоррекционные и реабилитационные мероприятия [8, 13].

Таким образом, необходимость оценки АЭ возникает при комплектовании штата организации, адаптации, развитии ЧР, мотивации и стимулировании ЧР, оценке человеческого (трудового, кадрового) потенциала и капитала, формировании резерва и ротации ЧР (продвижении по службе), диагностике и психокоррекционных мероприятиях, прогнозировании потребности в сотрудниках – количественного и качественного состава. Наглядной иллюстрацией подобной тесной связи между задачами управления служит диаграмма пересечения множеств задач управления ЧР (рис. 1).

На рисунке видно, что у каждой из задач есть области пересечения с исследуемой. Сопоставление площадей множеств на каждом конкретном предприятии может быть различным, отражая неповторимую специфику работы с АЭ в СТС.

Рис. 1. Взаимосвязь оценки состояния АЭ и других задач управления ЧР в виде диаграмм пересекающихся множеств

Особого пояснения требует термин «человеческий потенциал», который следует разделять с терминами «трудовой потенциал» – совокупность всех способностей и возможностей человека трудиться [14], и «кадровый потенциал», который, в свою очередь, определяют как показатель эффективности работы кадровых(ой) служб(ы) предприятия. Очень часто под «человеческим потенциалом» подразумевают кадровый резерв – совокупность отобранных субъектов, готовых и в лучшей степени подходящих для вступления на службу на высвобождающуюся должность, или человеческий капитал – часть интеллектуального капитала организации. «Человеческий потенциал» – это совокупность всех способностей и возможностей человека, а также убежденности и намерений чего-либо достичь. Несмотря на то что данное определение носит качественный характер, именно оно в полной мере может отразить актуальный во все времена девиз «сделай себя сам». И действительно, чем выше убежденность субъекта изменить себя, свой внутренний мир к лучшему, тем выше будет вероятность достижения нового равновесного состояния (гомеостаза) с окружающей средой и социумом, а, значит, более высокое значение потенциала.

Математические основы и методики оценки активных элементов

Совокупность измеряемых признаков конкретного работника назовем *пространством признаков специалиста* и включим в их состав две группы: профессиональные (знания, умения и навыки) и психофизиологические признаки [8]. Формирование признакового пространства психофизиологических и профессиональных показателей является ключевой и очень трудоемкой подзадачей исследований, которая, в силу существенного различия групп специальностей между собой и внутригруппового различия, должна быть решена для каждой должности штатного расписания сотрудников отдельно. Однако выключение из рассмотрения лица, принимающего решения (ЛПР), физиологической составляющей показателей в значительной степени ухудшает качество диагностики АЭ, т. к. психический уровень проявления деятельности человека в соответствии с принципами строения высшей нервной системы отражается на физиологическом, и наоборот. Другими словами, речь идет о необходимости фиксации психосоматических проявлений деятельности человека в процессе его изучения.

Первым классификационным признаком методик оценки АЭ является ее цель. Другими словами, речь идет о задаче управления ЧР, в контексте которой производится оценка (см. рис. 1). Например, можно выделить следующие методики оценки АЭ: профотбора, ротации, адаптации ЧР.

При выделении второго классифицирующего признака следует учесть многоэтапность процедуры оценки АЭ в конкретной прикладной методике. Например, для методики профотбора кандидатов на вакантные места предлагается использовать следующий перечень этапов.

1. Составление признакового пространства специалиста – по должностным инструкциям, бизнес-процессам организации и в соответствии с рекомендациями экспертов, отраслевыми стандартами.

2. Проведение исследования, связанного с формированием зависимостей (правил) между успешным выполнением должностных обязанностей специалиста и требуемых качеств соискателя.

3. Разработка модели специалиста, вычисление идеального или выбор эталонного портрета (профиля) специалиста.

4. Проведение процедур «грубого» отсева кандидатов прямым и/или косвенными методами для создания множества почти равноценных альтернатив: подбор на сайтах по трудоустройству, бирже труда, в социальных сетях, среди знакомых людей (технологии «прямого» поиска), при взаимодействии с вузами, Assesment-центрами, рекрутинговыми компаниями и др.

5. Проведение процедуры «тщательного» отбора в виде собеседования и тестирования (в некоторых случаях деловых игр, видеоинтервьюирования, программно-аппаратного диагностирования) для составления портретов конкретных соискателей на занятие вакантных мест.

6. Выбор ЛПР, а чаще – консилиумом экспертов, решения об оптимальном кандидате, и при согласии потенциального работника начало процедур юридического оформления взаимоотношений работника и работодателя, а также адаптации сотрудника.

С одной стороны, этапы 1, 2 и 3 могут отсутствовать, если на предприятии имеются ква-

лифицированные врачи-психологи, эксперты в предметных областях, достаточно компетентные для принятия решения. С другой стороны, при высоком уровне применения информационных технологий в организации все этапы могут быть полностью автоматизированы (путем разработки модулей «тщательного» отсева с использованием систем автогенерации идеальных портретов специалистов, экспертных систем профотбора, модулей «грубого отсева» с помощью распределенных систем, например, мультиагентных).

Целесообразно выделить следующие методики профотбора в соответствии с основными этапами его проведения: методики «грубого отсева», методики «тщательного» профотбора множества почти однородных альтернатив, методики «формирования признакового пространства специалистов», методики «выявления зависимостей между успешным специалистом и остальными признаками».

Для того чтобы перейти к конечным информационным технологиям применения методик, предложенных во второй классификации, следует также рассмотреть классификацию методик в зависимости от использования типа переменных: числовых или лингвистических. На рис. 2 построена общая схема, структурирующая различные виды методик оценки АЭ.

Как видно из рисунка, математические основы процедур отбора и информационные технологии находятся на нижнем уровне структурированного представления иерархии методик оценки АЭ, однако это не означает, что этапы оценки однозначно определяют подходящий тип переменной квалиметрии. Нередко происходит и обратный процесс: та или иная теория представления знаний определяет этапы процедуры оценок, т. к. они имеют имеют разную выразительную мощность, преимущества и недостатки использования друг перед другом. Эти теории также влияют на выбор подходов к разработке ПО (например, агентно-ориентированного, объектно-ориентированного) и средств автоматизации. Неудачно подобранный математический подход к квалиметрии может свести на нет все усилия программистов и экспертов в области управления ЧР.

Подробнее раскроем ряд методик профотбора ЧР по признаку, учитывающему виды математических теорий, пригодных для квалиметрии и последующего отбора работников.

1. Классическая алгебра чисел и Канторовская теория множеств. В таком подходе используются числовые оценки и различные комбинации с критериями. Существенным недостатком является произвол исследователей при выборе весов критериев, а также отсутствие коммуникации с ЛПР и экспертами при выставлении оценок на их языке, с помощью слов.

2. Лингвистическая оценка на основе парных сравнений рангов. Данное направление можно выделить в отдельную ветвь нечисловых методов, измерения и выбора лучшей альтернативы. ЛПР и эксперт при этом сравнивают альтернативы с помощью таких категорий языка, как «лучше», «хуже» или «равноценны». Из сказанного выше следует искусственное ограничение словаря квалиметрии для ЛПР и экспертов. При этом сам процесс принятия решения отдается на откуп экспертам, которые обладают большим жизненным опытом и интуицией и поэтому представляют своеобразный «черный ящик». Последний факт дает серьезную предпосылку для автоматизации отбора АЭ с помощью нейронных, нейрологических сетей и прочих моделей классификации (кластеризации), сконструированных по образу и подобию когнитивных систем человека и представляющих также «черный ящик» принятия решений.

3. Оценка лингвистических переменных. Направление подразумевает использование достижений теории нечетких множеств Л. Заде. Эта теория, получившая большое распространение в современной теории управления [7], имеет ряд преимуществ и недостатков использования [12]. Основная проблема, с которой часто сталкиваются исследователи, – необходимость выделения особых, существенных признаков АЭ, изменения которых должны приводить к бессмысленности дальнейших вычислений модели АЭ. Например, если в соответствии с вакантной должностью специалист по таможенному делу должен выпускать товары для свободного обращения, то абсолютно ясно, что существенными требованиями к кандидатам среди прочих будут стрессоустойчивость и хорошая деловая репутация. Если на соискание приходит человек, имевший несколько судимостей или состоящий на учете в психоневрологическом диспансере, то дальнейшее его рассмотрение на должность бессмысленно.

4. Лингвистическая оценка с использованием свертки значений при помощи логики антонимов. Данный подход, разработанный Я.Я. Голотой и В.Н. Тисенко, лишен недостатков, присущих нечеткой логике и описанных в п. 3.

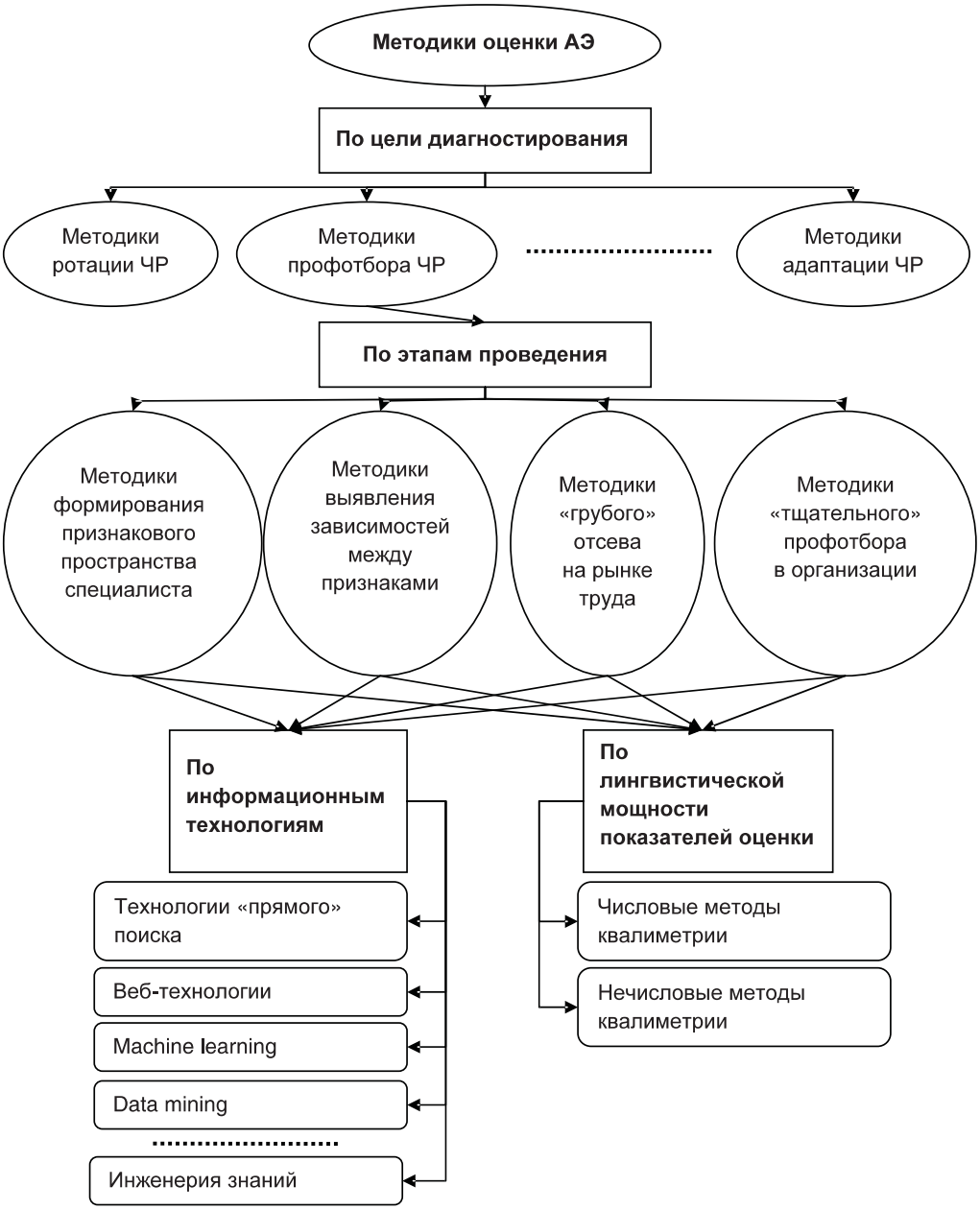


Рис. 2. Декомпозиция методики оценки АЭ на основные методики по четырем классифицирующим признакам: цели оценки, этапам оценки, лингвистической мощности показателей квалиметрии и используемым информационным технологиям

Информационная модель и портрет активных элементов

Конкретные значения признаковых пространств специалистов [12] можно сравнивать между собой и с эталонными и идеальными значениями. Будем называть конкретные значения квалификационной составляющей признакового пространства специалиста *квалификационным портретом специалиста*. По аналогии можно ввести новые термины: «психофизиологический портрет специалиста» и «совокупный портрет специалиста». Эти термины означают, соответственно, конкретные значения психофизиологической составляющей признакового пространства специалиста и совокупные значения признакового пространства специалиста. Целесообразно сократить высказывание «совокупный портрет специалиста» до «портрета специалиста». Если

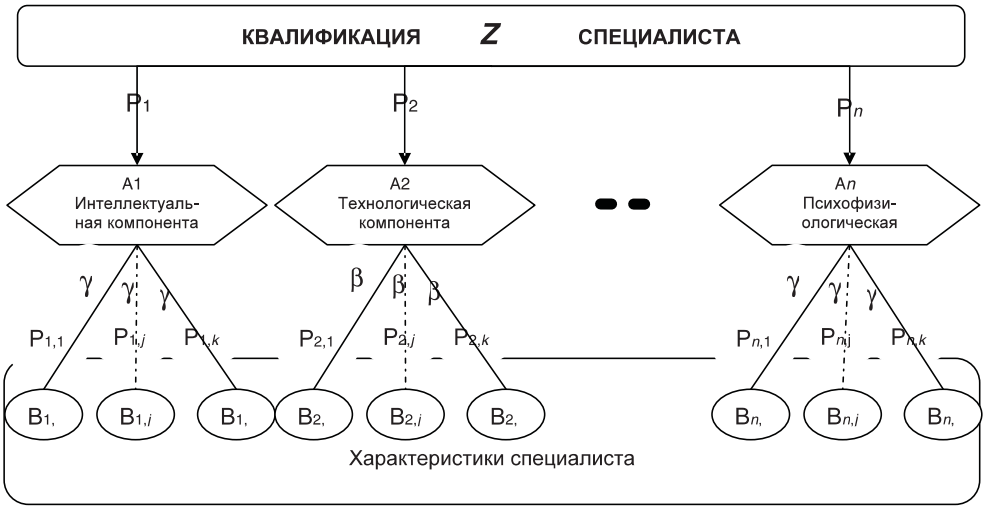


Рис. 3. Информационная модель специалиста как объекта управления. Логико-антонимический подход (авт. – О.В. Колосова)

обобщить оценку специалистов, в случае профотбора на остальные задачи управления ЧР, где необходимо диагностирование, то можно ввести термин «портрет АЭ».

Следует отметить, что портрет АЭ является лишь совокупностью показателей (компонентами вектора), которые рассчитываются по модели АЭ, поэтому от более абстрактной информационной модели управления АЭ (рис. 3) с учетом конкретной прикладной области работы субъекта, а, значит, с учетом выпестованного пространства признаков работников, переходят к формированию идеального портрета специалиста.

Среди большого разнообразия моделей специалистов, следует отметить предложенные в [1, 8, 10–12]. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Например, набор компонентов А.Г. Кравец [11, с. 68] Sp = R(I, E, S), где I – основные сведения, E – образование, S – профессиональные знания, R – резюме (финальный рейтинг); R = Sp (Zn, T), где Zn – комплекс знаний, умений и навыков, T – время; на наш взгляд, имеет некоторую избыточность, дублирование слотов E и S, а также отсутствие учета группы психфизиологических факторов. Очевидным преимуществом модели является учет динамичности изменений знаний, умений и навыков.

Обобщая модели специалистов, попробуем сформулировать модель активного элемента СТС:

$$AE = F(I, P, Zn),$$
$$F = AE(T),$$

где AE – Active Element – модель активного элемента; F – Functional – функционал, способный отразить совокупность показателей активного элемента в виде комплексной оценки, т. е. скалярной величины; I – Information – общая информация о специалисте; P – Psychophysiological – психофизиологическая группа показателей; Zn – профессиональная группа показателей (знаний, умений и навыков); T – время.

Разработанная модель АЭ, конечно, не содержит указания конкретных функциональных зависимостей F, которая должна быть сформирована с учетом множества разнообразных портретов АЭ, в достаточной мере отражающих практическую ситуацию диагностирования АЭ.

В соответствии с выбором логики антонимов в качестве наиболее приемлемого математического аппарата моделирования АЭ приведем пример графической модели специалиста, разработанной в [12].

Учитывая отраслевые требования и стандарты, в т. ч. образовательные, к компетенции специалистов в области транспортно-логистической и внешнеэкономичекой деятельности, а также оценки экспертов, с помощью логики антонимов (программное средство Graful 32) и учитывая предложенную модель АЭ, были разработаны:

общая модель специалистов ТЛиВЭД (перечень основных групп признаков);

портрет специалиста отдела специальных таможенных процедур Балтийской таможни (требования к деятельности см. [16]).

Рис. 4. Методические вопросы автоматизации оценки АЭ СТС

Методические подходы к автоматизации профотбора специалистов

Методические подходы к автоматизации оценки ЧР могут заключаться в рекомендациях по использованию тех или иных информационных технологий поддержки принятия решений, подходов к программированию, стратегий информатизации предприятий и использования математических основ применительно к квалиметрии ЧР.

Представим некоторые рекомендации по автоматизации методики профотбора специалистов.

Задача поиска функциональных зависимостей сводится, например, к задаче распознавания образов нейронными сетями, моделями поиска структуры деревьев и с помощью обработки статистики уравнениями регрессии [8], и может использоваться для выполнения 1–3 и 5 этапов предложенной методики профотбора. Такой подход может применяться в случае, если в рассматриваемой предметной области еще не появились эксперты, либо если у экспертов подорвано доверие к существующим технологиям выявления успешного специалиста (например, к психологическим тестам).

«Тщательный» профотбор на 5 этапе проведения может решаться правилами, сформированными экспертами и учитывающими лингвистическое описание при помощи нечеткой логики и логики антонимов [5, 12], а также в виде фреймов, онтологий [11, 9] в виде других форм представлений знаний, но при этом должна быть заранее установлена зависимость между признаком успешности специалиста (например, в виде дихотомного показателя «годен – непригоден» для *i*-й работы) и остальным признаковым пространством.

Обобщим методические подходы к автоматизации оценки АЭ с учетом декомпозиции функций управления СТС (рис. 4).

На рисунке представлена попытка визуализировать, насколько сложной и многофакторной является задача автоматизации оценки АЭ СТС.

Таким образом, предложены новые термины – «портрет», «модель» АЭ, обобщенные для всех видов методик оценок АЭ, что может помочь для разработки методики автоматизации оценки АЭ в целом и проектированию соответствующего универсального программного модуля. Раскрыта структура компонент модели АЭ. Разработаны и представлены классификационные признаки методик оценки АЭ: цель оценки, этапы проведения оценки, используемые информационные технологии и лингвистическая мощность показателей квалиметрии. Даны общие методические рекомендации по автоматизации оценки АЭ СТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бурков, В.Н.** Введение в теорию управления организационными системами: Учебник [Текст] / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков; Под ред. Д.А. Новикова. –М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. –264 с.

2. Исследование операций: в 2-х т. [Текст] / Пер. с

англ; Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. –М.: Мир, 1981. –Т. 2. –677с.

3. **Бурков, В.Н.** Большие системы: моделирование организационных механизмов [Текст] / В.Н. Бурков, Б. Данев, А.К. Еналеев [и др.]. –М.: Наука, 1989. –248 с.

4. **Весин, В.Р.** Управление персоналом. Теория и практика: Учебник [Текст] / В.Р. Весин. –М.: Проспект, 2011. – 688 с.

5. **Леоненков, А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Текст] / А.В. Леоненков. –СПб.: БХВ-Петербург, 2005. –736 с.

6**. Караваев, А.П.** Модели и методы управления составом активных систем [Текст] / А.П. Караваев. –М.: ИПУ РАН, 2003. –138 с.

8. **Квашнина, Г.А.** Донозологический мониторинг комплексной оценки для управления адаптивным состоянием субъекта в условиях экстремальной ситуации: монография [Текст] / Г.А. Квашнина, Я.О. Мун. –Воронеж: Изд-во ГОУВПО Воронеж. гос. технологич. ун-та, 2008. – 111 с.

Кудрявцев, Д.В. Системы управления знаниями и применение онтологий: Учеб. пособие для вузов [Текст] / Д.В. Кудрявцев. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 343 с.

10. **Миротин, Л.Б.** Основы менеджмента и управление персоналом, логистическая концепция: Учебник [Текст] / Л.Б Миротин, А.К. Покровский, В.М. Беляев. –М.: Горячая линия-Телеком, 2010. –238 с.

11. **Кравец, А.Г.** Согласованное управление региональными ресурсами рынка труда и качеством подготовки специалистов. Информ. модель специалиста: Монография [Текст] / А.Г. Кравец. –Москва-Волгоград: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, Волгоградский гос. технич. ун-т, 2004. –115 с.

12. **Колосова, О.В.** Синтез автоматизированных систем профессионального кадрового обеспечения: Монография [Текст] / О.В. Колосова. –СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. –112с.

13. **Квашнина, Г.А.** Рациональное управление развитием персонала организации на основе когнитивного динамического моделирования: Монография [Текст] / Г.А. Квашнина. –Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2004. –260 с.

14. **Зущина, Г.М.** Трудовые ресурсы и трудовой потенциал общества: Учеб. пособие [Текст] / Г.М. Зущина, Л.А. Костин. –М.: Изд-во АТиСО, 1996. –143 с.

15. **Станкевич, Л.А.** Когнитивный подход к моделированию и прогнозированию в социотехнических системах [Текст] / Л.А. Станкевич, Д.Л. Тимакин // Тр. конф. Системный анализ в проектировании и управлении. –СПб.:Изд-во СПбГТУ, 1999.

16. **Копейкина, Е.В.** Совершенствование таможенного оформления и таможенного контроля судов загранплавания через повышение качества использования человеческих ресурсов [Текст] / Е.В. Копейкина, В.А. Пархоменко, К.В. Швецов // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: Матер. междунар. науч.-практич. конф. Ч. XVIII. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010, –200 с.

УДК 614.847.7

М.В. Иванов, А.В. Матвеев

КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМ РИСКОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СРЕДСТВ АВАРИЙНОЙ ЭВАКУАЦИИ

Пожары – наиболее распространенные причины чрезвычайных ситуаций на объектах с массовым пребыванием людей. Поэтому снижение пожарного риска до социально приемлемого уровня, включая сокращение числа погибших и получивших травмы в результате пожара людей, может рассматриваться как важнейший индикатор и оценка эффективности функционирования системы пожарной безопасности.

В последнее время в целом ряде регионов России зарегистрировано увеличение числа пожаров, при которых отмечается большое количество погибших и травмированных людей, в т. ч. детей [1].

С развитием средств информации мир все чаще становится свидетелем того, как при пожарах в зданиях люди, будучи отрезанными от штатных путей эвакуации, вынуждены, спасаясь от огня и дыма, в отчаянии выбрасываться из окон верхних этажей. Между тем, мало кто задается мыслью, могла ли быть в подобной ситуации альтернатива гибельному шагу людей, выбрасывающихся из окон горящих зданий.

При этом в процессе обсуждения происшедших пожаров в средствах массовой информации и проведении расследований не возникает логичный вопрос о способах и путях самоспасения людей при пожарах. В таких ситуациях нередко

отрезаны штатные пути эвакуации, задерживаются с прибытием пожарные службы или вообще, прибывшие пожарные команды лишены возможности снять людей с окон.

Одно из перспективных направлений решения данной проблемы – применение различных спасательных средств: индивидуальных средств защиты органов дыхания и зрения от опасных факторов пожара, а также специальных средств аварийной эвакуации с высоты.

Применение средств аварийной эвакуации при пожарах особо актуально на объектах с массовым пребыванием людей по причине того, что именно на данных объектах могут создаваться значительные скопления людей в процессе штатной эвакуации, приводящие к задержкам времени эвакуации и, как следствие, воздействию опасных факторов пожара на людей. Именно на пожары в местах массового пребывания людей приходится наибольший социальный и материальный ущерб [1].

В связи с принятием в 2008 г. Федерального закона №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [2] особую актуальность приобретают выработка и внедрение в отечественную практику научно-обоснованных методик количественной оценки пожарного риска, позволяющих устанавливать соответствие реально существующего уровня риска законодательно установленному предельному значению.

В соответствии с [2, ст. 90] для зданий, сооружений и строений должно быть обеспечено устройство индивидуальных и коллективных средств спасения людей. При этом существующая методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [3] не учитывает возможность применения средств аварийной эвакуации.

Применение методов декомпозиции (рис. 1) позволило представить результаты процесса управления индивидуальным пожарным риском в здании в виде трех основных базовых показателей эффективности [4]. Предложенными показателями эффективности являются: $Q_{П}$ – вероятность наступления пожара на объекте защиты; $P_{ПЗ}$ – вероятность эффективной работы системы противопожарной защиты, направленной на обеспечение безопасной эвакуации людей; $P_{Э}$ – вероятность эвакуации людей из горящего здания.

Данный подход позволяет сформировать модель управления пожарной безопасностью на объекте защиты в целом, основанной на установлении формальной аналитической зависимости между тремя базовыми показателями эффектив-

Рис. 1. Структурная схема процесса управления пожарным риском в здании

ности управления пожарной безопасностью и общим интегральным показателем эффективности управления индивидуальным пожарным риском в здании.

В рамках данного подхода определена зависимость между данными показателями [5]:

$$Q_{В} = Q_{П}(1 - P_{Э})(1 - P_{ПЗ}), \qquad (1)$$

где $Q_{В}$ – интегральный показатель эффективности управления пожарной безопасностью (величина индивидуального пожарного риска на объекте защиты).

Средством, обеспечивающим выполнение приоритетных требований, направленных на обеспечение безопасности людей при пожаре, нормы [2, ст. 89] считают прежде всего «своевременную и беспрепятственную эвакуацию людей». Как показал опыт расчетов величин пожарных рисков на объектах различных классов пожарной опасности, на многих объектах с массовым пребыванием людей [6] не выполняется условие $P_{Э} = 0{,}999$. Данный фактор требует разработки комплексных мероприятий, направленных на своевременную и беспрепятственную эвакуацию. Сложнее всего обстоит дело со зданиями старой постройки, где нет возможности в полной мере удовлетворить требования пожарной защиты к эвакуационным путям и выходам. В ряде случаев выход кроется в аварийной эвакуации с использованием специальных спасательных средств.

Вероятность эвакуации $P_{Э}$ предлагается оценивать по формуле:

$$P_{Э} = 1 - (1 - P_{ЭП})(1 - P_{ЭС}), \qquad (2)$$

где $P_{ЭП}$ – вероятность эвакуации людей из здания по основным эвакуационным путям; $P_{ЭС}$ – вероятность эвакуации из здания людей через аварийные или иные выходы с использованием спасательных средств эвакуации.

Поскольку индивидуальный риск определяется тем, насколько быстро люди могут эвакуироваться в условиях развивающегося пожара, первостепенное значение имеют характерные времена протекающих процессов, схематически изображенные на рис. 2.

Возникновение и развитие пожара сопровождается распространением пламени и дыма, что приводит к возникновению опасного состояния среды как в помещении, где начался пожар, так и в соседних помещениях и на путях эвакуации. Спустя определенное время после возникновения пожара показатели опасного состояния среды могут достичь критических значений, что делает дальнейшую эвакуацию людей невозможной (блокирование путей эвакуации). Соответствующий интервал времени (см. рис. 2) называется *временем блокирования путей эвакуации*. Данное время зависит от геометрии помещения, характеристик очага пожара, работы противодымной вентиляции и т. п. Другим важнейшим временем является время эвакуации людей $t_{э}$. Данное время складывается из собственно времени движения людей (т. н. расчетное время эвакуации $t_{р}$) и времени начала эвакуации $t_{нэ}$, которое, в свою очередь, складывается из времени оповещения $t_{оп}$ и задержки начала движения $t_{з}$. Наконец, время оповещения складывается из времени обнару-

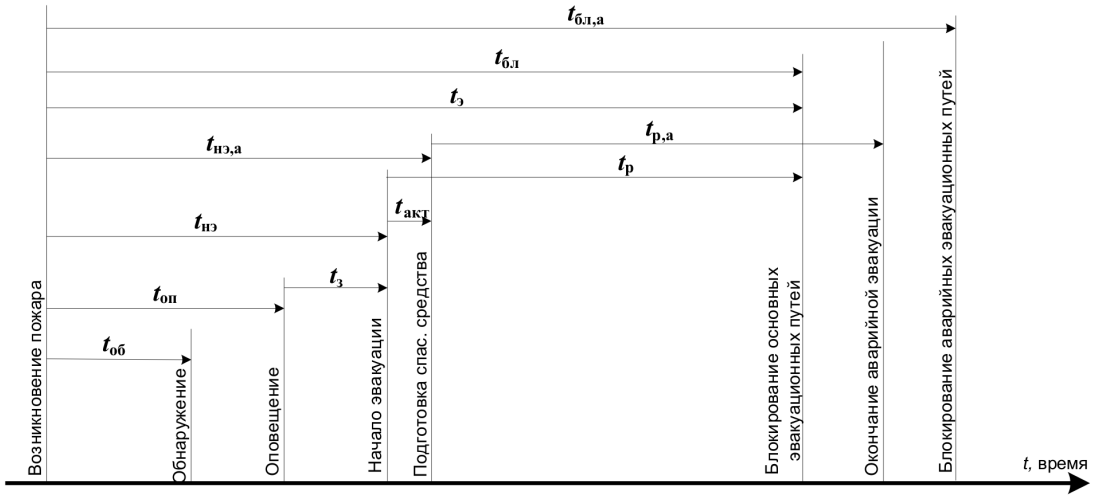


Рис. 2. Временные характеристики процессов развития пожара и эвакуации

жения пожара $t_{об}$ и возможной задержки, необходимой, например, для ручной активации системы оповещения.

Перечисленные выше составляющие времени эвакуации (за исключением $t_{об}$ для системы автоматического обнаружения пожара и, возможно, $t_{оп}$, если оповещение также осуществляется автоматически) существенным образом зависят от поведенческих особенностей, психофизиологического состояния людей и т. п., поэтому их моделирование сопряжено со значительными неопределенностями. Например, для времени задержки начала движения $t_з$ в литературе рассматриваются три составляющие процесса (осознание, интерпретация и действие) [7]. В [3] время начала эвакуации устанавливается в зависимости от функционального назначения помещений, косвенно характеризующего состояние находящихся в них людей, наличия и типа систем оповещения и управления эвакуацией, но не учитывается, что время обнаружения зависит от других характеристик: параметров очага пожара и геометрии помещения.

Вероятность эвакуации по основным эвакуационным путям $P_{ЭП}$, согласно [3] рассчитывают по формуле:

$$P_{ЭП} = \begin{cases} \dfrac{0,8 \cdot t_{бл} - t_р}{t_{нэ}}, \text{ если } t_р < 0,8 \cdot t_{бл} < t_р + t_{нэ} \text{ и } t_{ск} \le 6 \text{ мин} \\ 0,999, \quad \text{если } t_р + t_{нэ} \le 0,8 \cdot t_{бл} \text{ и } t_{ск} \le 6 \text{ мин} \\ 0,000, \quad \text{если } t_р \ge 0,8 \cdot t_{бл} \text{ или } t_{ск} > 6 \text{ мин} \end{cases}, \qquad (3)$$

где $t_р$ – расчетное время эвакуации людей, мин; $t_{нэ}$ – время начала эвакуации (интервал времени от возникновения пожара до начала эвакуации людей), мин; $t_{бл}$ – время от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них ОФП, имеющих предельно допустимые для людей значения, мин; $t_{ск}$ – время существования скоплений людей на участках пути.

Применение спасательных средств эвакуации необходимо в том случае, если требуемое время эвакуации людей $t_э$ оказывается больше времени блокирования основных путей эвакуации $t_{бл}$ (с коэффициентом запаса 0,8). В этом случае к временным характеристикам добавляется время подготовки спасательного средства к применению $t_{акт}$, расчетное время эвакуации через аварийные выходы $t_{р,а}$, а также время блокирования аварийных путей эвакуации $t_{бл,а}$.

Процесс аварийной эвакуации представляется последовательным выполнением ряда этапов.

Этап 1. Формирование потока движения людей к аварийному эвакуационному выходу с интенсивностью $\lambda_л(t)$.

Натурные наблюдения показывают, что размещение людей в потоке всегда имеет неравномерный и часто случайный характер. Расстояние между идущими людьми постоянно меняется, возникают местные уплотнения, которые затем рассеиваются и возникают снова. Эти изменения неустойчивы во времени. Такую структуру потока показывают и кинограммы [8]. Математические модели, воспроизводящие такую динамику и соответствующую статистику людского потока, получили название *имитационных стохастических*. Их построение базируется на описании зависимостей между скоростью и плотностью людского потока как элементарной случайной функции [8].

Использование при стохастическом моделировании в качестве исходных данных распределений вероятностей значений скорости движения людей позволяет отразить неоднородность состава потока как по уровню мобильных возможностей разных людей в потоке, так и по уровню их эмоциональных реакций на обстоятельства ситуации, в которой они оказались. Это позволяет наиболее полно оценить «возможность эвакуации людей независимо от их возраста и физического состояния...» [9].

Этап 2. Формирование интенсивности μ_1 подготовки людей к аварийной эвакуации при помощи спасательных средств, $\mu_1 = \dfrac{1}{\Delta t_п}$, где $\Delta t_п = \Delta t_и + \Delta t_т$, $\Delta t_п$ – среднее время, затрачиваемое на подготовку к эвакуации; $\Delta t_и$ – среднее время, затрачиваемое на выявление и идентификацию очередного эвакуируемого (появление данного промежутка времени связано в первую очередь с психофизиологическими аспектами поведения

людей в процессе эвакуации [7]); $\Delta t_т$ – среднее время, необходимое на подготовку технического средства к эвакуации каждого следующего человека (в случае необходимости).

Этап 3. Формирование интенсивности μ_2 перемещения людей в безопасную зону при помощи спасательных средств, $\mu_2 = \frac{1}{\Delta t_э}$, где $\Delta t_э$ – среднее время перемещения человека в безопасную зону при использовании специального спасательного средства.

Далее, с целью определения значения вероятности аварийной эвакуации при использовании спасательных средств, необходимо сформировать математическую модель процесса аварийной эвакуации, основанную на установлении формальной аналитической зависимости $P_{ЭС} = F(\lambda_л, \Delta t_п, \Delta t_э)$ между тремя базовыми компонентами, полученными при рассмотрении этапов аварийной эвакуации.

В случае использования z аварийных выходов и, соответственно, z спасательных средств вероятность $P_{ЭС}$ будет определяться следующим образом:

$$P_{ЭС} = 1 - (1 - P_{ЭС_1})(1 - P_{ЭС_2}) \times \ldots \times (1 - P_{ЭПz}), \quad (4)$$

где $P_{ЭС_i}$ – вероятность эвакуации из здания людей через i-й аварийный выход.

Оптимальное оснащение средствами спасения с высоты применительно к конкретному объекту зависит от возможных сценариев развития чрезвычайной ситуации, определяемых экспертным путем.

Для каждого i-го сценария развития пожара условие безопасной эвакуации людей состоит в том, что требуемое значение вероятности эвакуации людей $P_э$ удовлетворяет требуемым значениям. В противном случае часть эвакуируемых может подвергнуться воздействию поражающих факторов. Поскольку гибель людей может явиться результатом различных сценариев развития пожара, при вероятностном анализе риска необходимо рассмотреть совокупность всех возможных сценариев S_i ($i = 1, \ldots, N_S$), для каждого из них определить вероятность реализации сценариев $P(S_i)$ и последствия $P_э(S_i)$, а затем вычислить суммарный риск. При этом удобно выделить частоту возникновения пожаров $Q_П$ и вероятность эффективной работы системы противопожарной защиты $P_{ПЗ}$ отдельным множителем, а в качестве $P(S_i)$ рассматривать условные вероятности сценариев при возникновении инициирующего события – пожара. Тогда общая формула для определения величины индивидуального пожарного риска примет вид:

$$Q_В = Q_П(1 - P_{ПЗ}) \cdot \sum_{i=1}^{N_S} P(S_i)(1 - P_Э(S_i)). \quad (5)$$

В общем случае тип и количество спасательных устройств, необходимых для спасения людей из здания при пожаре, определяются следующими факторами, являющимися исходными данными в процессе моделирования:

контингентом людей, находящихся в здании, с учетом их возраста и физического состояния;

количеством людей, по тем или иным причинам не имеющих возможности покинуть здание за расчетное время эвакуации, пользуясь основными путями эвакуации;

расположением людей в здании на момент начала пожара, что позволит смоделировать движение людей по эвакуационным путям и их прибытие к аварийным выходам;

средним временем идентификации и подготовки людей к эвакуации;

средним временем подготовки спасательного устройства к работе;

средним временем перемещения человека на/в спасательном устройстве в безопасную зону;

предельно допустимым временем проведения аварийной эвакуации;

количеством человек, которые могут эвакуироваться одновременно при использовании спасательного средства (при рукавных спасательных средствах);

этажностью здания (высотой спуска).

Таким образом, в настоящей статье получила развитие методика, изложенная в [3]. Важно иметь в виду, что Технический регламент [2] устанавливает предельное значение для индивидуального пожарного риска, т. е. нацелен на обеспечение своевременной эвакуации людей при пожаре. При этом, однако, не затрагиваются вопросы о применении средств спасения с высоты, которые в ряде случаев могли бы позволить сократить расчетное время эвакуации людей при пожарах. Именно на решение данной проблемы и направлена настоящая работа.

Предложенный подход позволяет оценить влияние количественного состава и вида спасательных средств эвакуации с высоты на значение величины индивидуального пожарного риска в

здании. Кроме того, оказывается возможным решение обратной задачи – выработки управленческих решений по оснащению объектов современными средствами спасения и эвакуации с высоты с целью обеспечения на объектах требуемого значения индивидуального пожарного риска.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ, грант № МК-15.2011.10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Брушлинский, Н.Н.** Динамика и анализ рисков гибели детей и взрослых при пожарах в РФ за 1991–2008 гг. [Текст] / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, Е.А. Клепко [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. –2009. –№ 4. –С.21–26.

2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Текст] / Федеральный закон от 22.07.2008 №123–ФЗ.

3. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [Текст] / Приказ МЧС России от 30.06.2009 г. №382.

4. **Матвеев, А.В.** Системное моделирование управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций: Дис. …канд. техн. наук [Текст] / А.В. Матвеев. –СПб.: СПб УГПС МЧС России, 2007.

5. **Матвеев, А.В.** Методические подходы к анализу пожарного риска в зданиях [Текст] / А.В. Матвеев // Матер. XV Всерос. науч.-метод. конф. Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: 12–13 мая 2011. –СПб.: Стратегия будущего. – 2011. –Т. 3.

6. **Матвеев, А.В.** Анализ уровня пожарной безопасности образовательных учреждений в Санкт-Петербурге [Текст] / А.В. Матвеев, М.В. Иванов // Матер. XIII Всерос. конф. Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах по проблемам науки и высшей школы: 13–14 мая 2009. –СПб., 2009.

7. **Yung, D.** Principles of Fire Risk Assessment in Buildings [Text] / D. Yung. –N.Y.: J. Wiley & Sons, 2008.

8. **Холщевников, В.В.** Натурные наблюдения людских потоков: Учеб. пособие [Текст] / В.В. Холщевникйов, Д.А. Самошин, И.И. Исаевич. –М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. –191 с.

9. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст] / СНиП 21–01–97*.

УДК 004.021

И.А. Ходырев, С.В. Попова

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ PROCESS MINING ДЛЯ ЗАДАЧИ ПОИСКА МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ

Исследование процессов (process mining) – достаточно молодая область информатики [1]. Ее центральная задача – построение и верификация моделей процессов по журналам событий информационных систем. Область применения process mining в домене бизнес-процессов изображена на рис. 1.

На сегодняшний день существует множество алгоритмов по извлечению моделей процессов из журналов событий, описание большинства из которых можно найти в работе [2]. Наиболее широко из них используются следующие: α-алгоритм Ван Дер Аалста [3] («**α**»), эвристический алгоритм Вейтерса [4] («**H**») и генетический алгоритм Медейрос [2] («**G**»). Характеристики этих алгоритмов обычно комментируются на качественном уровне [2–5, 9], но в литературе мало внимания уделяется их численному сравнению. Известна единственная статья [5], посвященная данному вопросу, в которой предложено численное сравнение пяти алгоритмов, включая три упомянутых выше. Но их анализ представляется неполным. В нем отсутствует существенный для практического использования показатель времени работы; модели процессов фиксированы по размеру, что не позволяет оценить изменение качества результатов при увеличении сложности моделей; отсутствует тестирование на реальных журналах событий.

Рис. 1. Область применения process mining

В данной статье решена задача численного сравнения **α**, **H** и **G** алгоритмов process mining по следующим критериям: время работы; соответствие модели журналу событий; адекватность модели. Сравнение проведено на основании тестов над синтетическими моделями и реальными журналами событий.

Используемые понятия и обозначения. N – множество натуральных чисел. *Комплектом над множеством* S назовем отображение вида $B(S): S \to N$, которое ставит в соответствие каждому элементу множества S натуральное число. Заметим, что любое множество может быть записано в виде комплекта, в котором каждому элементу поставлена в соответствие единица. *Кортежем* или *последовательностью над множеством* S назовем отображением вида $\sigma(S) \in \{1, ..., n\} \to S$, где n – длина кортежа. Множество всех множеств над S обозначим как 2^S, множество всех комплектов над S – N^S, множество всех кортежей над множеством S – S^*. *Мощностью множества* $|S|$ назовем число элементов в этом множестве. Для комплектов определим отношение $\le (B_1(S), B_2(S)) \Rightarrow \forall s \in S, B_1(s) \le B_2(s)$.

Базовой единицей информации, используемой в дисциплине Исследование процессов, является «событие». Под событием (e) понимается любое изменение состояния процесса, которое *фиксируется* информационной системой. $e \in E$, где E – множество всех событий.

В статье используются три связанных понятия: *экземпляр процесса* (ЭП), *журнал событий* (лог) и *модель процесса* (МП). Под ЭП понимается кортеж событий $\sigma \in E^*$. В ЭП последовательно накапливаются события, фиксируемые информационной системой предприятия, происходящие в рамках некоторого процесса. Например, если в качестве процесса выступает «ремонт оборудования», то экземплярами этого процесса могут быть «ремонт котла № 1», «ремонт конвейерной линии» и др., каждый из которых включает свои последовательности реально произошедших событий. ЭП могут быть *завершенными* или *незавершенными*. В первом случае предполагается, что произошло событие, после которого других событий поступать не будет, во втором – процесс накопления событий еще не закончен.

Логом будем называть комплект ЭП $l \in B(E^*)$, L – множество всех логов. В логах накапливается информация обо всех протекающих ЭП как завершенных, так и незавершенных. В данной статье определяем лог как комплект, поскольку для рассматриваемых алгоритмов важны количества различных ЭП, записанных в лог, в то время как порядок следования ЭП не важен.

Под МП понимаем инструмент для задания подмножества множества всех кортежей событий, $M \subseteq E^*$. МП определяет множество допустимых ЭП для данного процесса. В настоящей статье для

задания МП используются маркированные сети Петри, определяемые далее.

Сеть Петри [3] (СП) – это ориентированный двудольный граф СП = (P, T, F, V, R), где P – конечное множество *мест*, T – конечное множество *переходов*, при этом $P \cap T = \varnothing$, $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – множество направленных дуг, называемое *отношением маршрутизации*, V – *множество строковых имен*, в котором присутствует пустое имя $""$, а $R(T): T \to V$ – *функция именования* переходов. Переход t называется *скрытым*, если $R(t) = ""$, в противном случае переход называется *явным*.

Для описания динамических процессов используется понятие *маркированной сети Петри* МСП = (СП, М), где СП = (P, T, F, V, R) и $\mathrm{M} \in B(P)$ – комплект над множеством мест, также называемый *маркировкой*. Каждый элемент этого комплекта назовем *жетоном*. Множество всех МСП обозначим Q.

Назовем элементы множества $P \cup T$ *узлами*. Узел x является *входящим узлом* для y, если $(x, y) \in F$. Множество входящих узлов для y задается как $\bullet y = \{x \mid (x, y) \in F\}$. Узел x является *исходящим узлом* для y, если $(y, x) \in F$. Множество исходящих узлов для y задается как $y\bullet = \{x \mid (y, x) \in F\}$.

Переход $t \in T$ является *разрешенным*, что обозначается как (СП, М)$\left[t\right\rangle$, тогда и только тогда, когда $\bullet t$ и М находятся в отношении $\leq$, то есть $\bullet t \leq \mathrm{M}$. Применение этого отношения возможно, поскольку, как упоминалось выше, любое множество может быть представлено в виде комплекта.

Чтобы описывать смену состояний для МСП вводится *правило срабатывания*. Правило срабатывания $_\left[_\right\rangle_ \subseteq Q \times T \times Q$ – это отношение, выполняемое для любых (СП, М)$\in N$ и $t \in T$ если (СП, М)$\left[t\right\rangle \Rightarrow$ (СП, М)$\left[t\right\rangle$ (СП, (М$\setminus \bullet t) \cup t\bullet$). *Последовательностью срабатываний переходов* (ПСП) для МСП (СП, M_0) будем называть кортеж $\sigma = t_1, t_2, ..., t_n$ в том случае, если $\exists n \in N$ такое, что для маркировок M_1, M_2, ..., M_n и переходов $t_1, t_2, ..., t_n$ для $\forall i \in N$ и $0 \leq i < n$ выполняется (СП, M_i)$\left[t_{i+1}\right\rangle$ и $\mathrm{M}_{i+1} = (\mathrm{M}_i \setminus \bullet t_{i+1}) \cup t_{i+1}\bullet$. В данной работе под МП будем понимать МСП (СП, M_0), у которой множество строковых имен V состоит из названий событий из лога. M_0 для такой модели будем называть *начальной маркировкой*. *Достижимой* из M_0 маркировкой M_{0X} назовем такую, для которой существует ПСП, приводящая из M_0 в M_{0X}. Маркировка называется *конечной* M_K тогда и только тогда, когда в ней не существует разрешенных переходов. M_{0K} будем обозначать конечную маркировку, которая достижима из начальной.

Алгоритмы process mining предназначены для *извлечения* МП из логов. Функция извлечения МП определяется в данной статье следующим образом: $\eta_A(L): L \to N$, где A – название алгоритма.

Критерии сравнения. Для сравнения алгоритмов выбраны три критерия.

1. *Время работы алгоритма* (далее – T_A). Это время, которое требуется алгоритму для окончания своей работы. Окончание работы идентифицируется по-разному для алгоритмов **α**, **H** и **G.** Для **α** и **H** работа алгоритма оканчивается, когда получена итоговая МП. Для **G**, поскольку он реализует стратегию перебора и теоретически может производить поиск очень долго, в данной работе окончанием считается достижение сотого поколения моделей, а полученной МП – наилучшая модель из сотого поколения. T_A измеряется в секундах.

2. *Соответствие модели журналам событий* (далее – f)[6]. Этот критерий позволяет оценить насколько точно полученная в результате работы алгоритмов МП отражает ЭП исходного лога. Расчет этого критерия осуществляется следующим образом:

1) Берется исходный лог l, состоящий из комплекта ЭП $l \in B(E^*)$.

2) Из l формируется множество I по правилу: $I = \{\sigma \mid \sigma \in l\}$, определяется мощность этого множества $k = |I|$.

3) Для каждого i-го ЭП σ_i из I, где $1 \leq i \leq k$, считается число раз, которое оно встретилось в логе $n_i = l(\sigma_i)$.

4) Для каждого i-го ЭП σ_i выполняется ПСП по полученной МП. Поскольку МП не всегда точно отражает лог, в процессе выполнения ПСП жетонов для удовлетворения правилу срабатывания может не хватать. Недостающие жетоны в этом случае добавляются и их число суммируется. Полученную сумму обозначим как m_i. После выполнения ПСП вследствие неточности модели могут остаться лишние жетоны. Обозначим их сумму как r_i. В процессе выполнения ПСП число порожденных по правилу срабатывания жетонов обозначим c_i, а число поглощенных по правилу срабатывания жетонов обозначим w_i.

5) Критерий соответствия рассчитывается по формуле $f = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i m_i}{\sum_{i=1}^{k} n_i c_i}\right) + \frac{1}{2}\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i r_i}{\sum_{i=1}^{k} n_i w_i}\right)$. Из формулы видно, что $0 \le f \le 1$, при этом чем ближезначение к нулю, тем меньше МП соответствует логу, и наоборот, чем ближе она к единице, тем соответствие логу больше.

3. *Адекватность модели* (далее – aaB) [6]. Критерий адекватности модели характеризует насколько точно модель отражает именно конкретный лог. Так, для одного и того же лога две разных модели могут иметь одинаковое значение соответствия. В этом случае более качественной моделью должна быть признана та, которая допускает как можно меньше других ЭП, помимо тех, которые встречаются в логе.

Расчет этого критерия осуществляется по той же схеме, что и расчет критерия соответствия до п. 3 включительно, а далее продолжается следующим образом:

4) Для каждого *i*-го ЭП σ_i выполняется ПСП по полученной МП. При каждом срабатывании перехода фиксируется число разрешенных в данной маркировке переходов, которое затем суммируется. Обозначим сумму числа разрешенных переходов x_i.

5) По МП вычисляется количество явных переходов, обозначаемое как *m*.

6) Критерий адекватности рассчитывается по формуле $aaB = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i (x_i - 1)}{(m-1) \cdot \sum_{i=1}^{k} n_i}$. Из формулы видно, что $0 \le aaB \le 1$, при этом чем ближе значение к нулю, тем больше логов МП допускает помимо основного, и наоборот, чем оно ближе к единице, тем модель менее свободна и больше отражает те данные, на которых построена.

Данные для синтетических экспериментов. Проверка распознавания алгоритмами основных конструкций, используемых в МП, проведена на синтетических логах, сформированных в соответствии с синтетическими моделями. Рассматривалось распознавание следующих пяти конструкций маршрутизации процессов: параллельность (далее – Par), скрытые события – пропуск (далее – IE-Skip), скрытые события – маршрутизация (IE-SplitJoin), выбор (далее – Choice), короткий цикл (далее – SLoop). Схемы указанных моделей представлены на рис. 2. Кроме того, изучалось влияние изменения сложности моделей на результаты экспериментов, поэтому для генерации синтетических логов использованы пятнадцать МП: по три порядка сложности для каждой из пяти исследуемых конструкций. Пример разных по сложности МП для конструкции Choice представлен на рис. 3.

Для порождения моделей с разной сложностью использован следующий алгоритм:

1) определить исходную МП с нулевой сложностью (МП-0) в терминах МСП, т. е. $\text{МП} = ((P, T, F, V, R), \text{M})$. Эта модель должна удовлетворять условию: $\exists p_1, p_2 \in P$ такие, что $|\bullet p_1| = 0$, $|p_2 \bullet| = 0$ и $\text{M}_0 = \{p_1\}$, $\text{M}_{0K} = \{p_2\}$;

2) в МП-0 определяется множество $T_R \subseteq T$ переходов, которые используются для увеличения сложности МП так, что $\forall t \in T_R : |\bullet t| = 1$, $|t \bullet| = 1$ (на рис. 2 и 3 названия $t \in T_R$ подчеркнуты);

3) определяется целевой порядок сложности $c \in N$;

4) если $c > 0$, то перейти к п. 5, иначе закончить;

5) сделать замену каждого перехода $t \in T_R$ на МП-0 так, чтобы p_1 из МП-0 совпало с $\bullet t$, а p_2 совпало с $t \bullet$, не сохраняя при этом маркировку вставленной МП-0, а также выполнить переименование всех явных переходов вставленной МП-0, добавив префикс: $R(t) + \text{"_"}$, где + – операция конкатенации строк, а *R* – функция именования переходов;

6) Положить $c = c - 1$, перейти к п. 4.

Синтетический лог на основе МП создается по следующему алгоритму:

1) определяется требуемое число ЭП $g \in N$;

2) если $g > 0$, перейти к п. 3, иначе закончить;

3) из M_0 порождать ПСП пока не достигнуто M_{0K}, при этом если в некоторой маркировке M_{0X} несколько переходов является разрешенными, то из них с равной вероятностью выбирается один, который в случае если он явный, присоединяется к ПСП;

4) сохранить полученную ПСП как завершенный ЭП в лог;

5) положить $g = g - 1$, перейти к п. 2.

Для всех пятнадцати МП создаются два лога: рабочий l_W и тестовый l_T. Методика формирования логов идентична и описана выше, при этом логи различаются по функциям: l_W предназначен

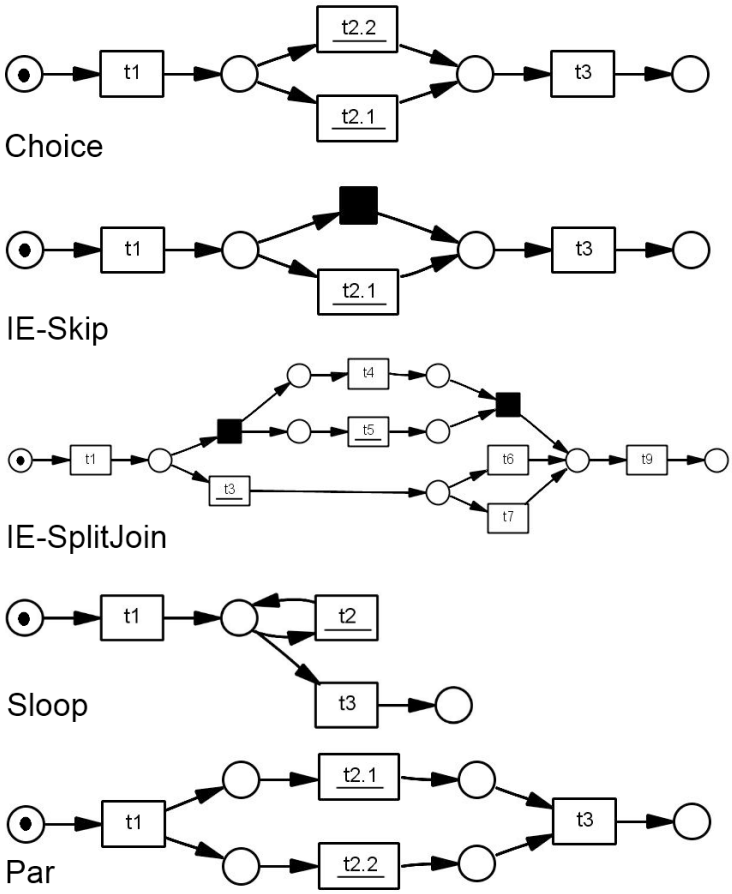


Рис. 2. Схемы МП для конструкций: Par, IE-Skip, IE-SplitJoin, Choice, SLoop

для формирования моделей алгоритмами, т. е. для $\eta_A(l_W)$, а l_T используется для расчета критериев по полученным моделям. Для каждого лога было взято $g = 500$.

Реальные данные. Реальные логи были взяты для процессов продажи (далее – Car_Sell) и ремонта (далее – Car_Rep) автомобилей автоцентра, а также для процессов обслуживания оборудования (далее – Fac_Rep) парфюмерного завода. В табл. 1 представлены основные параметры реальных логов: период времени, за которое получен лог (ПФ); число ЭП в логе (Всего ЭП); число различных ЭП в логе (Разл. ЭП); число событий в логе (Всего соб.); число событий с различными именами (Разл. соб.).

Во все ЭП в реальные логи добавлены фик-

Таблица 1

Характеристики реальных журналов событий

	Car_Sell	Car_Rep	Fac_Rep
ПФ	6 мес.	4 г. и 3 мес.	2 г.
Всего ЭП	6638	1202 (случайно выбран 1 % от общего числа за указанный период)	3391
Разл. ЭП	25	28	29
Всего соб.	28977	8079	25630
Разл. соб.	7	7	10

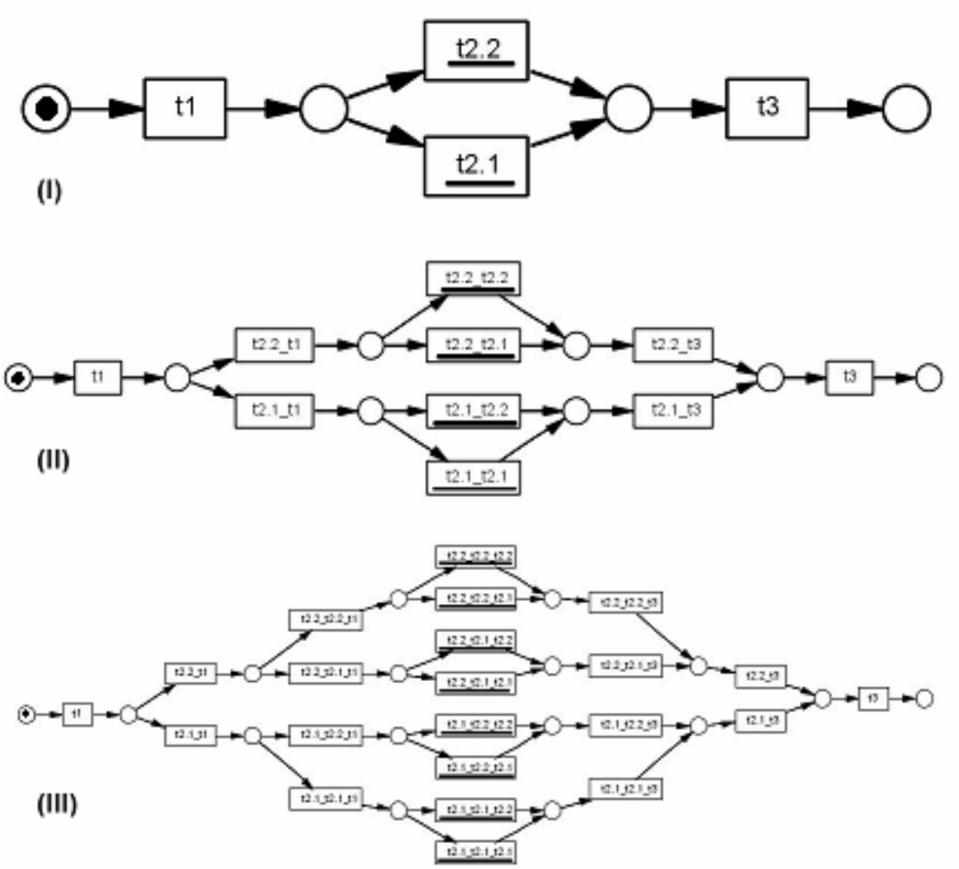


Рис. 3. I – исходная модель с нулевым порядком сложности; II – модель первого порядка сложности, полученная из I; III – модель второго порядка сложности, полученная из II

тивные события «START», предшествующие любому событию, и «END», завершающие любой ЭП, поскольку генетический алгоритм требует обязательного наличия идентичных стартового и конечного событий для всех экземпляров процесса [2]. Для реальных логов выполнено формирование рабочего l_W и тестового наборов l_T данных, путем разбиения исходного журнала событий в пропорции 50/50 %. Копии логов, использованных в экспериментах, можно найти в [7].

Получение значений критериев. Значения критериев для каждой синтетической и реальной МП (описаны в разделе «Критерии сравнения») вычисляются по следующему алгоритму:

1) положить $ex \in N$ равным требуемому числу экспериментов, положить $i = 1$;

2) если $i \le ex$, перейти к п. 3, иначе перейти к п. 6;

3) произвести построение $\text{МП}_{\alpha i} = \eta_\alpha(l_W)$, $\text{МП}_{Hi} = \eta_H(l_W)$, $\text{МП}_{Gi} = \eta_G(l_W)$ для алгоритмов **α**, **H** и **G** соответственно и сохранить абсолютное время работы каждого алгоритма T_{Ai} в секундах. Для **H** и **G** дополнительно производится конвертация полученной модели в сеть Петри;

4) для каждой полученной модели для данного эксперимента рассчитываются критерии f_i и aaB_i с использованием l_T;

5) положить $i = i + 1$, перейти к п. 2;

6) рассчитать среднее по формуле $y = \dfrac{\sum_{i=1}^{ex} y_i}{ex}$, где вместо y подставляются критерии T_A, f и aaB.

Во всех экспериментах $ex = 10$.

Использованные для тестирования средства. Для создания синтетических журналов событий реализовано программное средство на языке программирования Java. Для получения МП по логам использовано программное средство ProM [8], в котором присутствуют реализации требуемых алгоритмов: α-miner, heuristic miner и genetic miner для α, эвристического и генетического алгоритмов соответственно. Эксперименты прово-

Таблица 2

Результаты экспериментов над синтетическими журналами событий

		МП-0			МП-1			МП-2		
		α	G	H	α	G	H	α	G	H
Par	*f*	1	1	1	1	1	1	0,94	0,88	1
	aaB	1	1	1	1	0,90	1	1	0,54	1
	T_A	0,39	7,55	0,40	0,50	197,40	1,22	0,69	344	4,42
IE-Skip	*f*	0,89	1	1	0,92	1	1	0,94	0,95	1
	aaB	1	1	1	1	1	1	1	0,77	1
	T_A	0,54	1,33	0,50	0,62	8,6	0,65	0,39	763,10	0,70
IE-SplitJoin	*f*	1	1	1	0,88	0,97	0,97	0,84	0,94	0,97
	aaB	1	0,75	1	1	0,75	1	1	0,66	1
	T_A	0,37	18,30	0,41	0,58	481,97	0,36	0,35	540,55	0,35
Choice	*f*	1	1	1	1	1	1	1	0,99	1
	aaB	1	1	1	1	1	1	1	0,88	1
	T_A	0,40	1,26	0,56	0,60	9,30	0,52	0,40	786,90	0,79
SLoop	*f*	1	1	1	1	1	1	1	0,88	0,97
	aaB	1	0,62	0,62	1	0,75	0,75	1	0,56	0,71
	T_A	0,41	1,39	0,32	0,48	54,52	0,79	0,69	1944,70	2,66

дились с параметрами по умолчанию для этих алгоритмов.

Для среды Prom 6 на языке Java написан плагин, позволяющий оценивать время работы указанных алгоритмов. Также ProM предоставляет плагин Conformance Checker, в котором реализованы алгоритмы для расчета критериев соответствия модели журналам событий, и адекватности

Таблица 3

Результаты экспериментов над реальными журналами событий

	Car_Sell			Car_Rep			Fac_Rep		
	α	G	H	α	G	H	α	G	H
f	0,62	0,99	0,94	0,68	1	0,90	0,73	0,96	0,99
aaB	1	0,63	0,41	1	0,67	0,48	1	0,61	0,76
T_A	1,18	2278,30	1,97	3,23	4719,90	5,66	2,01	2854,70	3,25

модели. Этот плагин использован для расчета соответствующих критериев при оценке качества моделей.

Тестирование проводилось на ПК ASUS N60DP, с процессором AMD Turion II Dual – Core Mobile M500 2,20 ГГц; 4 Гб ОЗУ; под управлением операционной системы Windows 7 Home Premium Edition SP1.

Результаты экспериментов. Результаты экспериментов над синтетическими логами представлены в табл. 2; над реальными – в табл. 3, полученные алгоритмами модели можно найти в [7].

В синтетических тестах результаты **α** алгоритма оказываются наилучшими во всех случаях, за исключением моделей Par, IE-Skip и IE-SplitJoin. Это связано с тем, что **α** алгоритм не имеет возможности обнаруживать скрытые переходы, что и повлияло на результаты для моделей IE-Skip и IE-SplitJoin, которые содержат их. Однако на реальных данных **α** алгоритм показал наихудшие результаты по параметру *f* среди остальных. Это связано с тем, что в реальных данных, с одной стороны, присутствует шум, а, с другой, могут присутствовать ситуации, которые невозможно смоделировать без скрытых переходов. Невозможность работать с шумом и скрытыми переходами существенно ухудшает показатели **α** алгоритма.

Стоит отметить, что **α** алгоритм всегда создает адекватные модели, т. е. модели, не допускающие иного поведения, чем поведение из лога, и, кроме того, он работает наиболее быстро по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами.

G алгоритм в синтетических тестах в целом показал наихудшие результаты. Это связано, во-первых, с небольшим числом ЭП в синтетических логах, а, во-вторых, с ограничением на количество популяций (максимум 100 популяций). Тем не менее, на реальных данных **G** алгоритм показывает наилучшие результаты по параметру *f*, но так же, как и в синтетических тестах, существенно проигрывает по времени работы. Это связано с тем, что, с одной стороны, в реальных логах существенно больше информации, и, с другой, что в отличие от остальных алгоритмов **G** производит последовательный перебор моделей, а не синтез единственной модели на основе априорных допущений.

H алгоритм показывает наилучшие результаты в синтетических тестах в большинстве случаев. На реальных данных он несколько уступает **G** алгоритму по параметру *f* в двух тестах и незначительно превосходит его в третьем. При этом адекватность моделей, полученных **H** алгоритмом, – низкая по сравнению с генетическим алгоритмом. С другой стороны, преимуществом **H** алгоритма является время работы, которое сравнимо со временем работы **α** алгоритма.

Эксперименты показали, что наиболее целесообразным для практического использования будет комбинированный алгоритм на основе **H** и **G**, в котором для **G** будет установлено временное ограничение на получение МП, и итоговая МП выбирается после сравнения наилучшей МП, полученной за отведенное время **G**, с МП, полученной с помощью **H**.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **van der Aalst, W.M.P.** Workow Mining: A Survey of Issues and Approaches [Text] / van der Aalst W.M.P., B.F. van Dongen, J. Herbst // Data and Knowledge Engineering. –2003. –№ 47 (2). –P. 237–267.

2. **A.K.A. de Medeiros.** Genetic Process Mining [Text] / de Medeiros A.K.A. // PhD Thesis. –Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands, 2006.

3. **van der Aalst, W.M.P.** Workow Mining: Discovering Process Models from Event Logs [Text] / W.M.P. van der Aalst, A.J.M.M. Weijters, L. Maruster // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. –2004. –№ 16 (9). –P. 1128–1142.

4. **Weijters A.J.M.M.** Process Mining: Discovering Workflow Models from Event-Based Data [Text] / A.J.M.M. Weijters, W.M.P. van der Aalst // Proc. of the 13th Belgium-Netherlands Conf. on Artificial Intelligence (BNAIC 2001). –BNVKI, Maastricht, 2001. –P. 283–290.

5. **Weber, P.** A framework for comparing process mining algorithms [Text] / P. Weber, B. Bordbar, P. Tino [et al.] // GCC Conf. and Exhibition (GCC). –2011. –P. 625–628.

6. **Баскаков, Ю.Н.** Алгоритмы верификации выполнения процессов в информационных системах по эталонным моделям [Текст] / Ю.Н. Баскаков, И.А. Ходырев // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2009). –СПб., 2009.

7. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://dl.dropbox.com/u/11080654/_process_mining_testing.zip

8. **van der Aalst, W.M.P.** ProM 4.0: Comprehensive Support for Real Process Analysis [Text] / W.M.P. van der Aalst; Eds. J. Kleijn, A. Yakovlev [et al.] // Application and Theory of Petri Nets and Other Models of Concurrency (ICATPN 2007). –Springer-Verlag, Berlin, 2007. –Vol. 4546. –P. 484–494.

9. **van der Aalst, W.M.P.** Process Mining: A Two-Step Approach to Balance Between Underfitting and Overfitting [Text] / W.M.P. van der Aalst, V. Rubin, H.M.W. Verbeek [et al.] // Software and Systems Modelling (SoSyM). –2010. –Vol. 9 (1). –P. 87–111.

УДК 378.4

Ю.А. Ветринский

КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ НА БАЗЕ ШТАТНОЙ LMS

Анализ существующих подходов к построению программных систем контроля результатов обучения в вузах показывает, что все они реализуют классическое тестирование, особенностями которого являются гомогенный характер тестовых заданий, жесткая структура тестов и бинарная логика оценки ответов с представлением результатов в виде суммы баллов. При методически грамотном формировании тестов и правильной организации порядка их прохождения классический подход может быть достаточно эффективным, однако изменения последних лет в системе отечественного высшего образования предъявляют новые, более жесткие требования к системам контроля уровня знаний.

Ориентация на компетентностный подход предполагает необходимость оценки не только степени усвоения обучаемыми материалов той или иной темы, но и их способности применять полученные знания, а также личностных качеств, необходимых для успешной профессиональной деятельности. Гибкость в формировании курсов, предоставленная вузам государственными образовательными стандартами третьего поколения, обусловливает потребность в контроле за практической ценностью учебных материалов и методических приемов их подачи студентам. Все это делает более критичными такие недостатки классических систем контроля, как низкие возможности по оценке глубины остаточных знаний, слабые средства анализа практической ценности и корректности формулировки тестовых заданий и невозможность оценки эффективности используемых методик обучения.

Указанные недостатки могут быть преодолены при реализации систем контроля на основе технологий искусственного интеллекта, однако все известные на текущий момент интеллектуальные системы контроля знаний так и не вышли из стадии демонстрационных прототипов – не в последнюю очередь потому, что разрабатывались с нуля, без опоры на существующие приложения [1, 2].

Предлагается концепция построения интеллектуальной системы контроля на базе штатных средств тестирования систем управления обучением (Learning Management System – LMS), расширенных средствами одного из математических пакетов, поддерживающих работу со знаниями (операции с лингвистическими переменными, нечеткий вывод на правилах продукций, работа с гибридными нейронными сетями и др.). Достоинствами такого комплексирования программных систем являются возможность использования богатого арсенала средств LMS по разработке классических тестов, структурированному хранению тестовых заданий в базах данных, статистическому анализу результатов контроля и их развитого интерфейса в сочетании со специфическими функциями математических пакетов по обработке нечеткой информации.

Блок-схема интеллектуальной системы контроля знаний на базе LMS приведена на рис. 1. Программные блоки системы включают:

- интерфейс с обучаемыми – штатный интерфейс LMS, посредством которого производится взаимодействие с обучаемыми при контроле [3];
- стимулятор тестирования – штатные алгоритмические средства LMS, обеспечивающие обращение обучаемых к подсистеме тестирования – открытие и закрытие возможности доступа к тесту, ограничение времени тестирования, напоминание об очередном тесте в календаре LMS [3];
- блок адаптивного тестирования – штатные программные средства тестирования LMS, расширенные возможностью динамической выдачи результатов контроля во внешнюю систему ана-

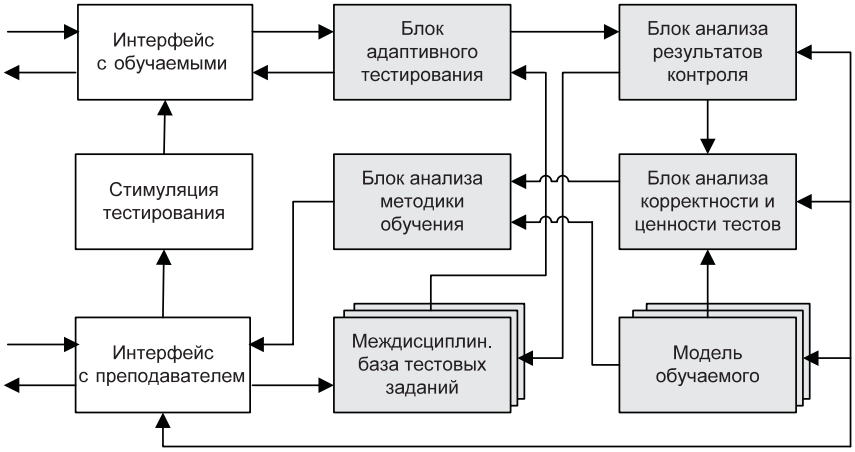


Рис. 1. Блок-схема интеллектуальной системы контроля знаний

лиза, в которой оценивается глубина усвоения материала, и возможностью предъявления обучаемым дополнительных заданий, загружаемых из базы тестовых заданий по команде из блока анализа результатов контроля;

• блок анализа результатов контроля – алгоритмические средства, реализующие нечеткий логический вывод об уровне знаний обучаемого на основании результатов прохождения тестов LMS. Этот программный блок является внешним по отношению к LMS и реализуется в математическом пакете, поддерживающем работу с лингвистическими переменными и нечеткой логикой. Блок включает библиотеку функций принадлежности термов лингвистических переменных, используемых для характеристики глубины знаний обучаемых, библиотеку правил и механизм нечеткого вывода. Входные численные значения результатов прохождения тестовых заданий преобразуются в форму нечетких высказываний, активизирующих определенный набор правил продукций, на котором осуществляется нечеткий логический вывод по выбранному алгоритму [4]. В зависимости от результатов вывода могут быть приняты решения о выборе нового задания, уточняющего знания студента, или о прекращении контроля с выдачей итоговых данных в блок анализа корректности тестов, модель обучаемого и преподавательский интерфейс. Задание и коррекция функций принадлежности термов, составление базы правил и выбор механизма нечеткого вывода осуществляется через преподавательский интерфейс;

• блок анализа корректности и ценности тестовых заданий – программные средства, обеспечивающие вывод о практической ценности тестовых заданий и корректности их формулировки разработчиком на основании результатов тестирования LMS и модели обучаемого. Этот блок является внешним по отношению к LMS и реализуется в математическом пакете, поддерживающем работу с нечеткой логикой. Блок включает в себя библиотеку функций принадлежности и набор правил, позволяющих по историческим данным о прохождении теста обучаемыми и сведений о текущем уровне знаний студентов определить его дидактическую ценность и корректность формализованного представления вопросов и ответов. Численные значения результатов контроля и сведения об обучаемых преобразуются в форму нечетких высказываний, активирующих правила, на которых проводится вывод. В зависимости от результатов вывода могут быть приняты решения о важности и корректности задания или, наоборот, о его низком обучающем потенциале или возможных некорректностях в формулировках вопросов и вариантов ответов. Результаты анализа выводятся на интерфейс преподавателя, откуда при необходимости производится корректировка тестовых заданий;

• блок анализа методики обучения – программные средства для оценки эффективности используемых преподавателями методик обучения с целью их промежуточной коррекции на основании сведений, полученных из базы хранения результатов тестирования LMS и модели обучаемого. Данный программный блок является внешним по отношению к LMS и реализуется в нечетком математическом пакете. Блок включает гибридную нейронную сеть, на основе которой

по историческим данным о результатах тестирования и сведениям о личностных качествах обучаемых осуществляется прогнозирование тренда успеваемости учебных групп, в которых ведется курс. Если результаты прогнозирования не позволяют уловить тренда к повышению уровня подготовки обучаемых при высоких показателях их личностных качеств, делается вывод о недостаточной эффективности методики преподавания с выводом соответствующего сообщения на преподавательский интерфейс, откуда производится и настройка параметров нейронной сети;

• модель обучаемого – база данных LMS, содержащая учетную информацию обучаемых, сведения об уровне их знаний, выявленные по итогам контроля, и данные о личностных качествах обучаемых – степени ответственности за результат обучения и уровне образованности. Учетная информация обучаемых и результаты их текущего контроля являются штатными сведениями баз данных LMS. Данные об образованности и ответственности обучаемых как трудно формализуемая информация, выражаются в формате нечетких лингвистических переменных. Сведения о личностных качествах играют важную роль при анализе корректности формализации тестовых заданий и адекватности методик обучения;

• междисциплинарная база тестовых заданий – хранилище тестовых вопросов LMS, обеспечивающая возможность обращения к вопросам из других дисциплин. Вопросы из междисциплинарной базы задействуются в блоке адаптивного тестирования после активизации, осуществляемой по сигналу блока анализа результатов контроля;

• интерфейс с преподавателем – штатный интерфейс LMS, через который производится контакт с преподавателями в процессе разработки тестовых заданий и сборки тестов, расширенный возможностью работы с внешними программными блоками, реализующими интеллектуальные функции – адаптивный контроль, анализ корректности и ценности тестовых заданий и эффективности методик обучения.

Взаимодействие программных блоков интеллектуальной системы контроля при организации учебной деятельности на базе LMS [5, 6] происходит в следующей последовательности. В установленное время обучаемые проходят текущий контроль, проводимый средствами LMS. Предъявление заданий осуществляется блоками из фиксированного числа вопросов. После отчета по первому блоку тестовых заданий анализатор результатов контроля выявляет пробелы в знаниях обучаемого по текущей и ранее изученным темам и дисциплинам. В соответствии с этими пробелами из базы тестовых заданий производится выбор и предъявление дополнительного блока вопросов из области, в которой обучаемый проявил наименее глубокие познания. Поскольку анализ результатов ведется в режиме реального времени, для обучаемого это выглядит просто как появление очередных заданий, хотя для него уже формируется индивидуальная траектория контроля. Дополнительные блоки тестовых заданий выбираются до достижения установленной глубины тестирования, чтобы избежать затягивания процесса контроля – обычно не более двух-трех шагов «вглубь» учебного материала.

По результатам адаптивного тестирования формируется оценка в формате сложного лингвистического высказывания, характеризующего глубину познаний обучаемого по текущему материалу и уровень его знаний по пройденным темам, необходимым для осознанного понимания текущей. Представляется, что такое представление результатов контроля скажет преподавателю об уровне подготовки студента значительно больше, чем классическая оценка результатов контроля в виде безликого числа баллов.

Результаты контроля – баллы и значения функций принадлежности лингвистических термов – сохраняются в базе данных LMS для дальнейшего использования при анализе тестовых вопросов и методик обучения, а также для формирования модели обучаемых – личностных качеств, выражаемых лингвистическими переменными «образованность» и «ответственность». Переменная «образованность» характеризует степень соответствия текущего уровня знаний и умений обучаемого требованиям образовательных стандартов. Она определяется как результат логического вывода на множестве правил продукций, условная часть которых является конъюнкцией нечетких высказываний, характеризующих глубину знаний по изученным разделам дисциплины. Переменная «ответственность» характеризует отношение обучаемого к учебе, учитывая степень его подготовки по текущей теме, посещаемость занятий, число обращений к учебному материалу, игнорирование тестирования и т. п.

При наборе определенной статистики контроля в работу включается блок анализа цен-

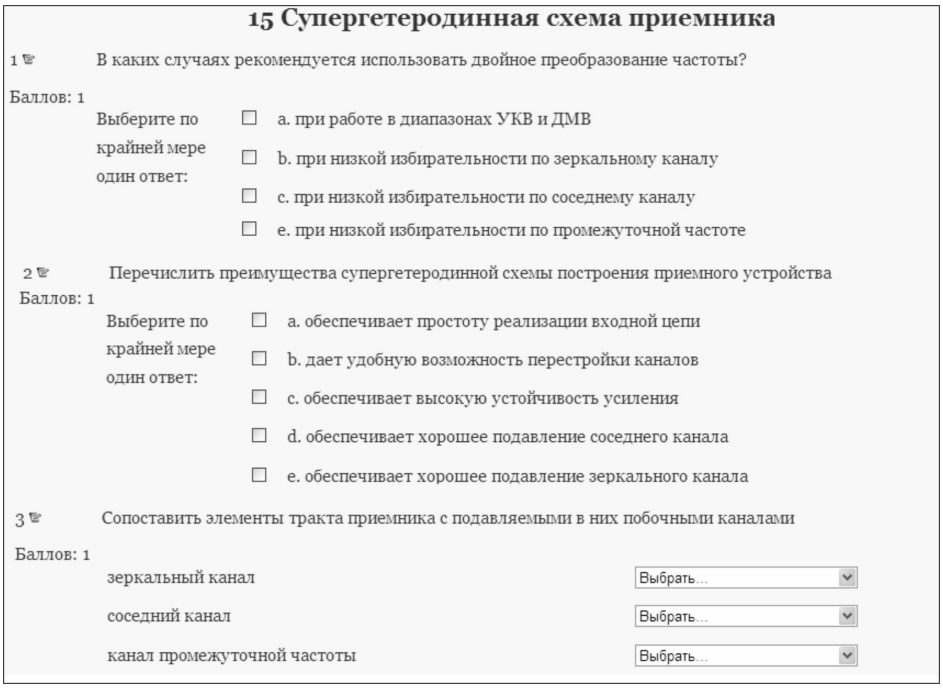


Рис. 2. Взаимодействие системы контроля знаний с обучаемыми

ности тестовых заданий и корректности их формализации. Практическая ценность задания для обучения определяется на основе анализа статистики его выполнения – в случае, если большинство обучаемых выполняет это задание на «хорошо» и «отлично», то ценность задания невелика, о чем сообщается через преподавательский интерфейс. В противоположном случае делается вывод о возможных некорректностях и неоднозначностях при формализации задания, о чем также сообщается.

После прохождения обучаемыми определенного числа тестов в работу включается блок анализа эффективности используемой методики

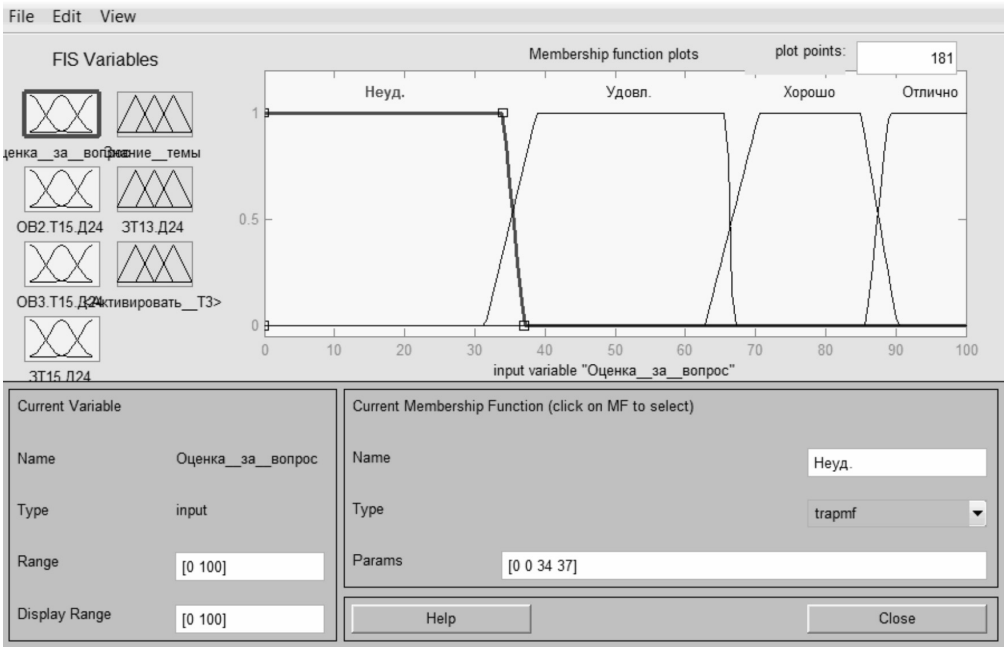


Рис. 3. Задание функций принадлежности лингвистических переменных

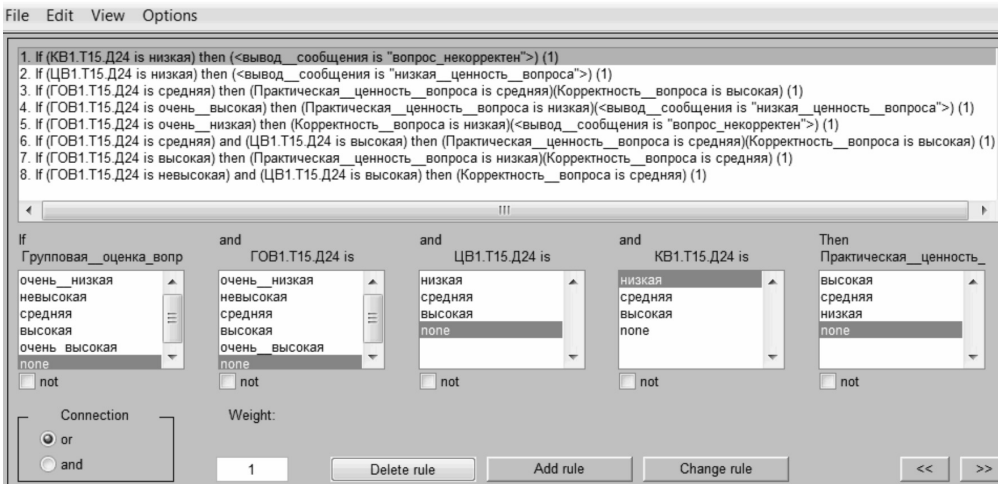


Рис. 4. Создание базы правил продукций для нечеткого логического вывода

обучения, строящий свою работу на модели «типового обучаемого» и данных о результатах тестирования. В качестве модели «типового обучаемого» выбирается студент, личностное качество «образованность» которого выше среднего, а качество «ответственность» – высокое. Результаты тестирования по пройденным темам обрабатываются в гибридной нейронной сети, на выходе которой формируются предсказания оценок по следующим темам. Если результаты нейросетевой обработки не выявляют положительного тренда в успеваемости «типового обучаемого», делается вывод о низкой эффективности методики обучения, о чем и сообщается преподавателю.

Для проверки предложенных концептуальных решений на кафедре радиотехники и телекоммуникации разработан экспериментальный прототип системы интеллектуального контроля результатов учебной деятельности на основе комплексирования LMS Moodle и математического пакета расширения MATLAB Fuzzy Logic Toolbox [7]. Динамический обмен данными в режиме реального времени между LMS Moodle и Fuzzy Logic Toolbox функций организован через стандартный DDE-интерфейс [8].

Взаимодействие обучаемых с системой в процессе адаптивного контроля осуществлялось в привычном интерфейсе LMS Moodle (рис. 2).

Функции построения лингвистических переменных, создания базы правил нечетких продукций, фаззификации количественных результатов контроля и нечеткого логического вывода по алгоритму Мамдани реализованы в пакете Fuzzy Logic Toolbox (рис. 3, 4).

Работоспособность прототипа и адекватность его выводов уровню остаточных знаний проверялись на базе дисциплины «Устройства приема и обработки сигналов». В ходе проверок система демонстрировала устойчивую работу в соответствии с описанным выше алгоритмом, формировала индивидуальные траектории контроля обучаемых и по требованию преподавателя выводила к полученным за тестирование оценкам в баллах комментарии на естественном языке (рис. 5).

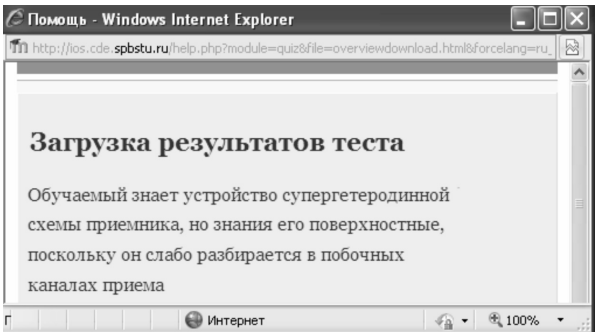


Рис. 5. Вывод результатов адаптивного контроля

Результаты проведенных проверок позволяют утверждать, что реализованная в соответствии с предлагаемой концепцией интеллектуальная система контроля действительно позволяет оценивать остаточные знания обучаемых на уровне, сопоставимом с результатами личного опроса.

Способности системы к совершенствованию тестовых заданий и эффективной корректировке методик обучения будут проверяться по мере накопления достаточного статистического материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рыбина, Г.В.** Обучающие интегрированные экспертные системы: некоторые итоги и перспективы [Текст] / Г.В. Рыбина // Искусственный интеллект и принятие решений. –2008. –№ 1. –С. 22–46.

2. **Ковтун, С.А.** О концепции создания интеллектуальных тестирующих систем [Текст] / С.А. Ковтун, С.Н. Капитан, О.О. Савельев // Искусственный интеллект. –2009. –№ 4. –С. 360–364.

3. **Ветринский, Ю.А.** Программные средства поддержки учебного процесса в информационно-образовательной среде университета [Текст] / Ю.А. Ветринский, А.Б. Никитин, В.А. Сороцкий, И.А. Цикин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2008. –№ 3 (60). –С. 256–264.

4. **Ветринский, Ю.А.** Ситуационная система поддержки принятия решений с нечетким классификатором [Текст] / Ю.А. Ветринский // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. –2001. –Т. 44. –№ 2. –С. 3–7.

5. **Ветринский, Ю.А.** Опыт использования технологии смешанного обучения в практике преподавания технических дисциплин [Текст] / Ю.А. Ветринский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2009. –№ 5 (86). –С. 185 – 190.

6. **Ветринский, Ю.А.** Использование средств электронного обучения в общеобразовательной школе [Текст] / Ю.А. Ветринский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2010. –№ 6 (113). –С. 164–169.

7. **Леоненков, А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Текст] / А.В. Леоненков. –СПб.: БХВ-Петербург, 2003. –736 с.

8. **Болдырев, Ю.Я.** Технология сетевого доступа к программной среде MATLAB на основе кластерной вычислительной системы [Текст] / Ю.Я. Болдырев, В.А. Варгаузин, Е.П. Петухов, И.А. Цикин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2009. –№ 5 (86). –С. 31–38.

УДК 007

Р.М. Юсупов

ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАТИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Лауреатом Нобелевской премии по физике за 2000 г. стал академик Ж.И. Алферов, петербуржец, вице-президент Российской академии наук. Высокая премия получена им за исследования полупроводниковых гетероструктур и создание на их основе лазеров, что привело к появлению новой электроники, являющейся основой элементной базы современных информационных технологий. Результаты фундаментальных работ Ж.И. Алферова широко применяются при создании волоконно-оптических каналов связи, в т. ч. Интернета, лазерных диодов, используемых в проигрывателях CD-дисков, быстродействующих транзисторов, необходимых для мобильных телефонов и спутниковой связи, и факт присуждения ему Нобелевской премии является в определенной степени признанием в его лице и заслуг Санкт-Петербурга не только в области физики, но и в области информатики и информационных технологий.

В данной статье под информатикой будем понимать науку о методах и средствах сбора, хранения, передачи, представления, обработки и защиты информации. Если исходить из рассмотрения генеалогического дерева развития информатики, т. е. если учитывать тот факт, что это научное направление развивалось под активным влиянием математики, логики, теории связи, кибернетики (теории управления) и других наук, то можно считать, что «российская» информатика в значительной мере зарождалась в нашем городе.

В связи с этим нельзя не упомянуть наших выдающихся математиков, в трудах которых развиты основы приближенных вычислений и численных методов (П.Л. Чебышев, А.Н. Крылов, В.А. Стеклов), линейного программирования (Л.В. Канторович), математической логики (А.А. Марков-младший), теории устойчивости (А.М. Ляпунов), теории вероятностей и математической статистики (П.Л. Чебышев, Ю.В. Линник, А.М. Ляпунов, А.А. Марков, С.Н. Бернштейн). Их работы оказали заметное влияние на формирование теоретических основ информатики, в развитии которой в дальнейшем приняли уча-

стие многие ленинградцы-петербуржцы, многие научно-исследовательские, проектные и образовательные учреждения города.

Некоторые заметные этапы (события), связанные со становлением информатики и информационных технологий в Санкт-Петербурге, представим в виде следующего хронологического ряда:

1882 – создание П.Л. Чебышевым арифмометра с планетарной передачей;

1895 – изобретение радиосвязи А.С. Поповым;

1904 – создание А.Н. Крыловым механического интегратора для обыкновенных дифференциальных уравнений;

1918 – создание Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе;

1925–1943 – исследования А.И. Берга в области радиотехники, радиосвязи и радиолокации;

1950 гг. – создание кафедр по вычислительной технике и информатике в ЛПИ, ЛИТМО, ЛЭТИ, ЛИАП, ВКА имени А.Ф. Можайского и других вузах;

1953–1954 – разработка технологии крупноблочного программирования (Л.В. Канторович);

1956 – создание секции кибернетики при Ленинградском доме ученых (Л.В. Канторович);

1957–1958 – создание в ЛПИ первой в СССР специализированной ЦВМ для обработки результатов траекторных измерений ИСЗ (Т.Н. Соколов);

1961 – создание ОКБ ЛПИ по информационно-вычислительной технике;

1962 – создание первой в мире управляющей мини-ЭВМ УМ1-НХ (Ф.Г. Старос, И.В. Берг);

1968 – создание ЦНИИ РТК – Научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики;

1968 – создание в ОКБ при ЛПИ АСУ РВСН (Т.Н. Соколов);

1970 – создание кафедры математического обеспечения ЭВМ в ЛГУ (С.М. Ермаков, С.С.Лавров – 1971);

Начало 1970-х гг. – разработка первых в СССР монолитных больших интегральных схем (Ф.Г. Старос, И.В. Берг);

1974 – разработка принципов построения рекурсивных ЭВМ (В.М. Глушков, В.А. Мясников, М.Б. Игнатьев, В.А. Торгашев);

1978 – создание Ленинградского научно-исследовательского вычислительного центра (СПИИРАН);

1979 – создание макетного образца рекурсивной ЭВМ, более производительной, чем БЭСМ-6 (М.Б. Игнатьев, В.А. Торгашев);

1980 – создание ВЦКП, на базе которого в 1995 г. формируется ГП ИАЦ мэрии Санкт-Петербурга;

1987 – создание оригинального отечественного суперкомпьютера ЕС-2704 с динамической архитектурой с производительностью до 500 млн операций в секунду (В.А. Торгашев, В.У. Плюснин);

1984–1990 – выполнение Государственной территориально-отраслевой программы развития народного хозяйства Ленинграда и Ленинградской области на основе автоматизации и широкого использования ВТ на 1984–1990 гг. «Интенсификация 90» (И.А. Глебов, В.М. Пономарев);

1992 – основание Международной конференции «Региональная информатика»;

1994 – создание Департамента связи и информатизации (с 1996 г. – управление информационного и телекоммуникационного обеспечения канцелярии Губернатора Санкт-Петербурга, с 2001 г. – Комитет по информатизации и связи Правительства Санкт-Петербурга);

1994 – создание Объединенного научного совета по проблемам информатики, управления и телекоммуникаций при Президиуме СПбНЦ РАН;

1994 – создание Научного совета по информатизации Санкт-Петербурга;

1995–1998 – реализация телекоммуникационных проектов RUNNET (СПбГУИТМО), ROSNET (ГНЦ ЦНИИ РТК), РОКСОН (СПбГУ, ФТИ имени А.Ф. Иоффе, СПИИРАН, ПИЯФ);

1999 – разработка и утверждение концепции «Стратегия перехода Санкт-Петербурга к информационному обществу» (Постановление Правительства СПб от 16.08.99 г., № 36);

1999 – учреждение Консорциума Форт-Росс (объединение ряда компаний – разработчиков ПО);

2000 – присуждение Ж.И. Алферову Нобелевской премии по физике за 2000 г. за исследование опто- и микроэлектронных элементов, являющихся элементной базой ИТ;

2002 – создание Партнерства для развития информационного общества на Северо-Западе России;

2009 – проведение 29 мая в издательстве газеты «Санкт-Петербургские ведомости» круглого стола на тему «Нужны ли России информацион-

ные технологии?» (В. Макаров, В.Г. Пешехонов, Э.А. Тропп, А.А. Шалыто, Р.М. Юсупов).

2010–2011 – успехи команд СПбГУ и СПбГУИТМО на чемпионатах мира по программированию.

Раскроем более подробно содержание некоторых позиций этого ряда.

Изобретатель радио А.С. Попов (1859–1906) в 1883 г. окончил физико-математический факультет Петербургского университета. Преподавал в Минном офицерском классе (1883–1901) и Техническом училище Морского ведомства (1890–1900). В 1901 г. начал преподавать в Электротехническом институте (ныне – СПбГЭТУ). В 1905 г. был избран первым выборным директором этого института.

Изобретение А.С. Поповым радиосвязи в 1895 г. оказало определенное влияние на дальнейшее развитие беспроводных систем связи и передачи данных. Все современные беспроводные системы (сотовые мобильные системы, радиовещание, телевидение, Интернет и т. д.) основаны на единых принципах радиосвязи, открытых еще в конце XIX столетия.

Академик А.И. Берг (1893–1979) свое военное и инженерное образование получил также в нашем городе. Он закончил в Санкт-Петербурге Морской корпус, четыре курса (на правах вольнослушателя) Петроградского политехнического института, Высшее военно-морское инженерное училище (ВВМИУ) и Военно-морскую академию. Впоследствии стал начальником созданного по его инициативе Научно-исследовательского морского института связи, вел преподавательскую деятельность в ВВМИУ, в Военно-технической академии РККА, в Ленинградском электротехническом институте, в Военно-морской академии. Его научные работы ленинградского периода были связаны с теорией и практикой радиопередающих и радиоприемных устройств, радиопеленгования, с применением ультракоротковолновых сигналов в технике коммуникации, навигации и обнаружения и опознавания объектов. В 1936 г. под руководством А.И. Берга были проведены первые в нашей стране опыты по радиолокации.

А.И. Берг достаточно серьезно интересовался историей изобретения радио. Фактически его работа «А.С. Попов и изобретение радио», опубликованная в 1935 г. положила начало формированию в стране научной документальной истории радио. В 1966 г. по инициативе А.И. Берга и под его редакцией был подготовлен сборник документов «Изобретение радио А.С. Поповым» [1].

В послевоенный период, занимая высокие посты в правительстве и АН СССР, А.И. Берг всемерно поддерживал развитие кибернетики и электронно-вычислительной техники. Огромное значение он придавал вопросам, относящимся к информации, и всячески одобрял идеи и предложения, связанные с формированием тогда еще совсем юной информатики.

Развитие любого научного направления приводит к необходимости подготовки соответствующих специалистов.

Информационная революция активизировала в пятидесятых годах появление в вузах нашего города значительного числа кафедр по информатике, информационным технологиям, программированию и вычислительной технике. Примечательно, что эти новые кафедры, как правило, создавались на базе кафедр кибернетического профиля (автоматика, телемеханика, управление). Это был вполне объяснимый и естественный процесс, т. к. современная информатика зарождалась в недрах кибернетики [3, 4]. В этом отношении характерен опыт близкой автору Военно-воздушной инженерной академии имени А.Ф. Можайского (ныне – Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского). В 1949 г. в Академии была создана первая в системе МО СССР кафедра автоматики и телемеханики, которую возглавил профессор Е.П. Попов (впоследствии академик РАН). В 1958 г. на ее базе были созданы четыре кафедры: автоматического управления, инфракрасной техники и фотооборудования, автономных систем управления и вычислительных машин военного применения. В 1961 г. последняя кафедра породила кафедру электронно-вычислительных машин (ЭВМ) и автоматизации управления войсками. Наконец, в 1972 г. из кафедры ЭВМ выделилась кафедра математического обеспечения.

Примерно таким же образом создавались информационные кафедры в Политехническом университете, Электротехническом университете, Университете аэрокосмического приборостроения, Университете информационных технологий, механики и оптики и в ряде других технических вузов города и страны.

Примечательным событием, оказавшим заметное влияние на развитие информатики и вычислительной техники, стало открытие в 1970 г. кафедры математического обеспечения ЭВМ на математико-механическом факультете ЛГУ, хотя начало преподавания программирования в Университете началось еще в 1953 г.

С 1971 г. ее возглавил член-корреспондент

АН СССР С.С. Лавров – один из основоположников отечественного программирования. В 1995 г. кафедра математического обеспечения ЭВМ была преобразована в кафедру информатики. В 1991 г. на математико-механическом факультете СПбГУ была создана кафедра системного программирования. Эти две кафедры образовали Отделение информатики в составе Учебно-научного центра математики, механики и астрономии СПбГУ.

Продолжалось развитие информационных кафедр и в других вузах. Так, последние годы ознаменовались созданием кафедр по подготовке весьма востребованных специалистов в области информационной безопасности и защиты информации.

О высоком уровне подготовки в городе специалистов по информатике, информационным технологиям и программированию свидетельствуют громкие победы наших школьников и студентов на различных международных соревнованиях. В этом отношении весьма характерны наши успехи на командных чемпионатах мира по программированию (табл. 1). Санкт-Петербург – единственный город в мире, команды двух университетов которого в течение ряда лет неизменно становились призерами.

Серьезный вклад в развитие отечественной микроэлектроники (элементная база ИТ) и вычислительной техники в нашем городе внесли Филипп Георгиевич Старос (1918–1978) и Йозеф Вениаминович Берг (1916–1998). В созданной

Таблица 1

Результаты чемпионатов мира по программированию в 2000–2011 гг.

Год	Место проведения	Победители	Участники от Санкт-Петербурга	Место
2000	Орландо, Флорида США	Санкт-Петербургский государственный университет	СПб государственный университет. СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики	1 5
2001	Ванкувер, Канада	Санкт-Петербургский государственный университет	СПб государственный университет. СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики	1 3
2002	Гонолулу, Гавайи США	Шанхайский университет	СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики	11
2003	Беверли Хиллс, Калифорния США	Варшавский университет	СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики. СПб государственный университет	3 30
2004	Прага, Чехия	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики	СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики. СПб государственный университет	1 27
2005	Шанхай, Китай	Шанхайский университет	СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики. СПб государственный университет	3 17
2006	Сан-Антонио, США	Саратовский государственный университет	СПб государственный университет. СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики	6 19
2007	Токио, Япония	Варшавский университет	СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики. СПб государственный университет	3 14
2008	Банф, Альберта, Канада	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики	СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики. СПб государственный университет	1 11
2009	Стокгольм, Швеция	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики	СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики. СПб государственный университет	1 3
2010	Харбин, Китай	Шанхайский университет	СПб государственный университет	9
2011	Орландо, США	Университет Чжэдзян	СПб государственный университет	4

ими лаборатории, впоследствии конструкторском бюро электронной техники, разработаны первый в стране куб ферритовой памяти, первые в мире настольные вычислительные системы УМ1-НХ (управляющие ЭВМ для народнохозяйственного применения), большие интегральные схемы для них. Они же были разработчиками проекта первого отечественного Центра микроэлектроники в Зеленограде.

Активному развитию информатики, информационных технологий и вычислительной техники в городе способствовало сосредоточение в нем значительного числа научно-исследовательских и проектных организаций соответствующего профиля: ЦНИИ РТК, ПО «Светлана», НПО «Авангард», ЦНИИ «Электроприбор», НПО «Радар», НПО «Импульс», ЦНИИ «Гранит», ВНИИРА, НИИ «Вектор», НПО «Ленинец» и др.

Ведущим в городе и стране центром проведения фундаментальных и прикладных исследований в области микроэлектроники, создающей элементную базу информационных технологий, вычислительной техники и средств связи, был и остается Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе.

В 1978 г. на базе отдела вычислительной техники ФТИ имени А.Ф. Иоффе был организован Ленинградский научно-исследовательский вычислительный центр, преобразованный в 1985 г. в институт. Сегодня это Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). За годы своего существования Институт стал одним из ведущих научных учреждений на Северо-Западе России в области информатики, информационных технологий и автоматизации. Сегодня Институт проводит фундаментальные и прикладные исследования по широкому спектру научных направлений. Основные из них:

фундаментальные основы информатики и информационного общества;

теоретические основы построения ИТ для интеллектуальных систем автоматизации научных исследований, управления, производства и других сфер деятельности;

фундаментальные основы, модели и методы исследования информационных процессов в сложных системах (социо-, био-, геосистемах и др.);

теоретические основы построения аппаратно-программных комплексов, ориентированных на обработку информации в реальном масштабе времени;

фундаментальные основы информационной безопасности и защиты информации.

Результаты деятельности Института подробно изложены в обзорах [1, 2]. Остановимся кратко на работах, проводимых под руководством профессора В.А. Торгашева по созданию оригинальных, нетрадиционных суперкомпьютеров с динамической архитектурой. Эти работы в приведенном выше хронологическом ряде выделены отдельными позициями.

Впервые идея и принципы создания нетрадиционной многопроцессорной вычислительной системы были доложены в 1974 г. на конгрессе ИФИП в Стокгольме в совместном докладе В.М. Глушкова, В.А. Мясникова, М.Б. Игнатьева и В.А. Торгашева. В 1979 г. макетный образец рекурсивной ЭВМ был предъявлен Государственной комиссии.

В дальнейшем силами коллектива В.А. Торгашева в стенах СПИИРАН новая модель организации вычислений на базе теории динамических автоматов получила свое дальнейшее развитие. Было показано, что данная модель позволяет строить процессы, модули и суперкомпьютеры с динамической архитектурой на основе программных логических интегральных схем (ПЛИС). В середине 80-х гг. XX в. с участием В.А. Торгашева в рамках советской суперкомпьютерной программы был создан мультипроцессор с динамической архитектурой ЕС-2704 со средней производительностью 100 млн операций в секунду, а для некоторых задач – до 500 млн операций в секунду. При создании ЕС-2704 использовалась отечественная элементная база с невысоким уровнем интеграции. В НИИ ЦЭВТ выпущено несколько промышленных образцов МДА ЕС-2704, которые использовались в режиме опытной эксплуатации в ряде организаций (НПО «Комета», НПО «Энергия», НПО «Атолл») для обработки больших массивов цифровой информации в реальном времени (радиолокация, гидролокация, спутниковая телеметрическая информация и т. д.).

Возможности реализации методов теории динамических автоматных сетей на современной элементной базе ПЛИС американской фирмы Altera были проверены и подтверждены рядом практических разработок, в частности, в процессах с динамической архитектурой для обработки радиолокационной информации. Такие процессоры уже более 15 лет выпускаются ООО «Динамические электронные системы» (Санкт-Петербург). Процессоры ДАП3117 и МОРС-42 используются в соответствующих радиолокационных системах ВМФ, ФПС РФ, в ряде портов страны.

С Физико-техническим институтом имени

А.Ф. Иоффе связано имя Ж.И. Алферова, проработавшего там с 1953 по 2006 г. В 1987–2003 гг. он был директором этого института, с 2003-го по 2006-й – научным руководителем.

Выше уже было отмечено, что Ж.И. Алферов получил Нобелевскую премию по физике фактически за развитие информационных технологий. Этой проблеме он уделил и продолжает уделять огромное внимание. Достаточно вспомнить его уникальную лекцию «Физика и информационные технологии», представленную научной общественности и студентам в 2009 г. Большой интерес и резонанс в стране и за рубежом вызвал организованный по его инициативе Санкт-Петербургский научный форум «Наука и общество», посвященный информационным технологиям, который был проведен в сентябре 2009 г. одновременно с IV Петербургской встречей лауреатов Нобелевской премии. Не случайно и то, что ряд других российских и международных премий получен Ж.И. Алферовым фактически за работы в области информационных технологий. Это, в частности, касается Демидовской премии и Золотой медали имени А.С. Попова, полученной «За цикл работ в области развития методов и средств радиоэлектроники, в том числе для обработки информации». Символично также то, что Ж.И. Алферов стал почетным доктором ряда университетов информационного и технологического профиля, в т. ч. Пекинского университета почты и телекоммуникаций, Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Сегодня Жорес Иванович – один из руководителей созданного с его участием Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН.

Значительный вклад в развитие информатики и информационных технологий в Санкт-Петербурге и стране внесли сформировавшиеся в вузах и исследовательских учреждениях города научные школы: Л.В. Канторовича и С.С. Лаврова в области теории программирования и математического обеспечения ЭВМ, В.И. Сифорова в теории информатики и радиоэлектроники, В.Б. Смолова и С.А. Майорова в области вычислительной техники, Т.Н. Соколова (информационно-управляющие системы), Н.А. Железнова (теории информации и кодирования), В.И. Варшавского (теория автоматов и асинхронных систем) и др.

Достаточно эффективно функционировала в городе и система общественных организаций. К основным из них можно отнести Научный совет по информатизации Санкт-Петербурга (создан в 1994 г.), Объединенный научный совет по проблемам информатики, телекоммуникаций и управления при Президиуме Санкт-Петербургского научного центра РАН (1994), Санкт-Петербургское общество информатики, связи и управления (1991), Комиссия по связи, информатизации и транспорту Общественного совета Санкт-Петербурга (2000), Партнерство для развития информационного общества на Северо-Западе России (2002), секция информационных технологий и электроники научно-технического совета при Правительстве Санкт-Петербурга (2004).

Особую роль в развитии информатики, информационных технологий и информатизации сыграли международные конференции «Региональная информатика». Первая конференция была проведена в 1992 г., последняя, XII – в 2010 г. За эти годы конференции стали центром консолидации интересов и усилий научной общественности, специалистов, работников вузов и представителей органов власти, имеющих отношение к информатике и формированию информационного общества.

Конференция «Региональная информатика-1992» стала одним из первых форумов в стране, на котором начали рассматриваться архиважнейшие проблемы в условиях глобальной информатизации общества – вопросы информационной безопасности. Учитывая важность этой проблемы по рекомендации конференции «Региональная информатика-1998» организована самостоятельная конференция «Информационная безопасность регионов России». К 2011 г. проведено семь таких конференций.

В России развитие научно-технологической сферы страны в значительной мере определяется реализацией «Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ». Этот перечень утверждается Президентом страны и раз в несколько лет корректируется. В перечнях 1996, 2002 и 2006 г. традиционно присутствовали информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИКСТ). В 2009 г. Правительство поручило Министерству образования и науки подготовить предложения для очередной коррекции Перечня. Министерство подготовило весьма странный проект – предложило из Перечня приоритетных направлений исключить ИКСТ. Не менее странным является обоснование этого решения: ИКСТ надо исключить, потому что «Россия в целом значительно отстает от развитых стран по уровню научных исследований в области информационно-коммуникационных

Таблица 2

Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в РФ

2006 г.	Предложения Минобрнауки РФ (2009 г.)		Предложения Президента РФ (2009 г.)	Утверждены Указом Президента РФ (7 июля 2011 г. № 899)
	1-я версия	2-я версия		
Безопасность и противодействие терроризму. Живые системы. Индустрия наносистем и материалов. Информационно-телекоммуникационные системы. Перспективные вооружения, военная и специальная техника. Рациональное природопользование. Транспортные, авиационные и космические системы. Энергетика и энергосбережение	Развитие наноиндустрии. Науки о жизни. Экология и ресурсосбережение. Энергоэффективность и энергосбережение	Информационно-телекоммуникационные системы. Рациональное природопользование. Индустрия наносистем. Науки о жизни. Энергоэффективность и энергосбережение. Транспортные и космические системы	Энергосбережение, в т. ч. разработка новых видов топлива. Ядерные технологии. Космические технологии, прежде всего связанные с телекоммуникациями (ГЛОНАСС и наземная инфраструктура). Медицинские технологии. Стратегические информационные технологии, включая создание суперкомпьютеров и программного обеспечения	Безопасность и противодействие терроризму. Индустрия наносистем. Информационно-телекоммуникационные системы. Науки о жизни. Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники. Рациональное природопользование. Транспортные и космические системы. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика

технологий» [5]. Кстати, вместе с ИКСТ было предложено исключить и такие направления как «Безопасность и противодействие терроризму», «Перспективные вооружения и специальная техника», «Транспортные, авиационные и космические системы». Предложения экспертов Минобрнауки вызвали недоумение и беспокойство специалистов и научной общественности. Редакция газеты «Санкт-Петербургские ведомости» провела 29 мая 2009 г. круглый стол по теме «Нужны ли России информационные технологии?». Участниками круглого стола были гендиректор Концерна «ЦНИИ Электроприбор» академик В.Г. Пешехонов, главный ученый секретарь Президиума Санкт-Петербургского научного центра РАН доктор физ.-мат. наук Э.А. Тропп, заведующий кафедрой технологии программирования СПбГУИТМО А.А. Шалыто, президент некоммерческого партнерства «Руссофт» В.А. Макаров и автор этой статьи. Участники встречи в процессе обсуждения пришли к единодушному мнению, что предлагаемый Перечень может иметь катастрофические последствия для национальной безопасности и всего дальнейшего развития страны. Полный текст дискуссии опубликован в газете «Петербургские ведомости» от 29.05.2009.

Аналогичное отношение к проекту Минобрнауки выразили и многие другие специалисты и организации. В результате появилась вторая версия предложений, куда уже были включены ИКСТ (табл. 2). Окончательно проблема была решена Указом Президента от 7 июля 2011 г., который фактически сохранил Перечень приоритетных направлений 2006 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. История информатики и кибернетики в Санкт-Петербурге (Ленинграде). Вып. 1: Яркие фрагменты истории [Текст] / Под общей ред. чл.-корр. РАН Р.М. Юсупова. –СПб.: Наука, 2008.

2. История развития информатики и кибернетики в Санкт-Петербурге (Ленинграде). Вып. 2: Яркие фрагменты истории [Текст] / Под общей ред. и с участием чл.-корр. РАН Р.М. Юсупова. –СПб.: Наука, 2009.

3. **Юсупов, Р.М.** Концептуальные и научно-методологические основы информатизации [Текст] / Р.М. Юсупов, В.П. Заболотский. –СПб.: Наука, 2009.

4. **Юсупов, Р.М.** Проблемы развития кибернетики и информатики на современном этапе [Текст] / Р.М. Юсупов, Б.В. Соколов // Кибернетика и информатика. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.

5. Материалы «О подготовке предложений по корректировке Приоритетных направлений развития науки в РФ и Перечня критических технологий РФ» [Текст]/ Поручение Правительства РФ от 12 июля 2008 г. № СН-П7-4183, № АХ-268/04 от 2 апр. 2007 г.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АНТЫШЕВ Евгений Павлович – *аспирант кафедры информатики Московского физико-технического института.*

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. E-mail: eantyshev@gmail.com

АРСЕНЬЕВ Дмитрий Германович – *проректор по академической и международной деятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 28. Тел. (812)534-10-01, e-mail: newton@imop.spbstu.ru

БЕНДЕРСКАЯ Елена Николаевна – *доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. (812)297-42-18, e-mail: Helen.bend@gmail.com

БЕРКОВСКИЙ Николай Андреевич – *доцент кафедры математики Института международных образовательных программ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.*

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 28.

БОЛДЫРЕВ Юрий Яковлевич – *заведующий кафедрой математического и программного обеспечения высокопроизводительных вычислений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: boldyrev@phmf.spbstu.ru

БОРТЯКОВ Даниил Евгеньевич – *доцент кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

БРЫК Иван Юрьевич – *старший преподаватель кафедры компьютерных и интеллектуальных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, уч. корп. 11. E-mail: ivan.bryk@avalon.ru

ВАСИЛЬЕВ Алексей Евгеньевич – *кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. (812)297-42-18, e-mail: avasil@kspt.ftk.spbstu.ru

ВАСИЛЬЕВА Татьяна Павловна – *аспирант кафедры прикладной математики и информатики Пермского государственного национального исследовательского университета.*

614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15. E-mail: vasilyeva_09@mail.ru

ВЕТРИНСКИЙ Юрий Анатольевич – *доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: vetrinsky@mail.spbstu.ru

ВЛАСОВ Андрей Вячеславович – *докторант кафедры автоматизации технологических процессов Саратовского государственного технического университета.*

413860, Саратовская обл., г. Балаково, ул. Транспортная, д. 4, БИБиУ. Тел. (8453)32-57-88, e-mail: bibu_rect@mail.ru

ГЕРМАН Елена Александровна – *аспирант факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, программист I категории.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: elena250573@rambler.ru

ГРИГОРОВ Антон Сергеевич – *аспирант кафедры математики Череповецкого государственного университета.*

162600, г. Череповец, Советский пр., д. 8. E-mail: AntonGrigorov1986@gmail.com

ДАВЫДОВ Александр Евгеньевич – *директор ФГУП «НИИ «Масштаб», кандидат технических наук.*

194100, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 5, лит. А. E-mail: mstb@users.mns.ru

ДЕГТЯРЕВА Ирина Викторовна – *заведующий кафедрой экономической теории Уфимского государственного авиационного технического университета, доктор экономических наук, профессор.*

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. E-mail: degtjareva@mail.rb.ru

ДМИТРИЕВ Александр Георгиевич – *профессор факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812)552-88-49, e-mail: dmitriev.ag@mail.ru

ДОНЦОВА Анастасия Васильевна – *студентка кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. (812)297-42-18

ЖУКОВ Константин Георгиевич – *доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, кандидат технических наук.*

197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова. Тел. (812)277-57-76, e-mail: k.g.zhukov@gmail.com

ЗАМОТИН Кирилл Юрьевич – *начальник отдела прикладных программных систем Информационно-телекоммуникационного комплекса Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ЗАХАРЕВИЧ Надежда Викторовна – *ведущий программист ООО «Русская веб-служба».*

194021, Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр., д. 62. E-mail: nadya@rwwws.ru

ЗИНОВЬЕВ Иван Игоревич – *инженер регионального центра новых информационных технологий Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых.*

600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87. Тел. (4922)47-75-34, e-mail: izinoviev@vlsu.ru

ИВАНОВ Владимир Михайлович – *профессор кафедры информатики Института международных образовательных программ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук.*

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 28.

ИВАНОВ Дмитрий Игоревич – *ведущий программист кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: dmitry.ivanov@list.ru

ИВАНОВ Марат Валерьевич – *аспирант кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: ivanovmarat06@mail.ru

ИЛЬЮШИН Юрий Валерьевич – *ассистент кафедры информатики и информационных технологий Пятигорского государственного гуманитарно-технологического университета.*

357500, г. Пятигорск, ул. 40 лет Октября, д. 56. E-mail: bdbyu@rambler.ru

ИЛЬЯСОВ Барый Галеевич – *заведующий кафедрой технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета, профессор, доктор технических наук.*

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел./ф. (347)273-78-35, e-mail: ilyasov@tc.ugatu.ac.ru

КАРТАШЕВА Татьяна Анатольевна – *аспирант кафедры технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета.*

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. E-mail: kartashevat@yandex.ru

КЕТОВ Дмитрий Владимирович – *доцент кафедры компьютерных и интеллектуальных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, уч. корп. 11. E-mail: dketov@avalon.ru

КОЗЕЛЕЦКАЯ Татьяна Александровна – *доцент Международной высшей школы управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат экономических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: marta9578@mail.ru

КОЗЛОВ Владимир Николаевич – *заведующий кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: umo@citadel.stu.neva.ru

КОНСТАНТИНОВ Юрий Александрович – *аспирант кафедры прикладной математики Пермского национального исследовательского политехнического университета.*

614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29. E-mail: nworhm@rambler.ru

КОРОТКОВ Александр Станиславович – *профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812)552-61-59

КРЮКОВ Игорь Иванович – *доцент кафедры прикладной математики Пермского национального исследовательского политехнического университета, кандидат технических наук.*

614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29. E-mail: olga@pstu.ru

КУЗНЕЦОВА Эльвира Михайловна – *аспирант кафедры автоматизации технологических процессов Саратовского государственного технического университета.*

413860, Саратовская обл., г. Балаково, ул. Транспортная, д. 4, БИБиУ. Тел. (8453)32-57-88, e-mail: bibu_rect@mail.ru

КУПРЕЕНКО Сергей Витальевич – *ассистент кафедры телематики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. E-mail: ksw@neva.ru

МАКАРОВ Сергей Борисович – *заведующий кафедрой радиоэлектронных средств защиты информации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail makarov@cee.spbstu.ru

МАКАРОВА Елена Анатольевна – *доцент кафедры технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета, кандидат технических наук, докторант.*

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347)273-78-35, e-mail: ea-makarova@mail.ru

МАТВЕЕВ Александр Владимирович – *кандидат технических наук, доцент кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: fcvega_10@mail.ru

МЕДВЕДЕВ Алексей Викторович – *профессор кафедры высшей математики Кемеровского государственного университета, доктор физико-математических наук, доцент.*

650043, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6. E-mail: Alexm_62@mail.ru

МЕДВЕДЕВ Владимир Михайлович – *профессор кафедры комплексного радиоэлектронного контроля космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, кандидат технических наук.*

197110, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13. E-mail: V_M_Medvedev@rambler.ru

МЕЩЕРЯКОВ Сергей Владимирович – *соискатель Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук, доцент.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

МУРГО Андрей Игоревич – *студент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. (812)297-42-18

МЫЗНИКОВА Бэла Исаковна – *доцент кафедры информационных систем и математических методов в экономике Пермского государственного национального исследовательского университета, кандидат физико-математических наук.*

614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15

НИКИТИН Кирилл Вячеславович – *ассистент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. (812)297-42-18, e-mail: execiter@mail.ru

НИКОЛАЕНКО Юлия Викторовна – *аспирант кафедры автоматизации технологических процессов Саратовского государственного технического университета.*

413860, Саратовская обл., г. Балаково, ул. Транспортная, д. 4, БИБиУ. Тел. (8453)32-57-88, e-mail: bibu_rect@mail.ru

ПАРХОМЕНКО Владимир Андреевич – *аспирант кафедры управления в социально-экономических системах Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ПУТУХОВ Евгений Павлович – *начальник отдела системного программного обеспечения Информационно-телекоммуникационного комплекса Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ПОБЕДАШ Павел Николаевич – *докторант кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета.*

660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», д. 31. Тел. (3912)91-91-41, e-mail: pobed_pnp@mail.ru

ПОПОВА Светлана Владимировна – *старший преподаватель кафедры компьютерных интеллектуальных технологий в проектировании Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ПОСКРЕБЫШЕВ Максим Михайлович – *инженер-исследователь оптической лаборатории Пермского национального исследовательского политехнического университета.*

614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29.

РАШИЧ Андрей Валерьевич – *доцент кафедры радиоэлектронных средств защиты информации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корп. 2. Тел. (812)552-61-89

РОМАНОВ Роман Игоревич – *студент кафедры прикладной физики и оптики твердого тела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корп. 2. E-mail: gh56jkl@mail.ru

РУСАКОВ Сергей Владимирович – *заведующий кафедрой прикладной математики и информатики Пермского государственного национального исследовательского университета, доктор физико-математических наук.*

614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15

ТИМЕНКОВ Юрий Владимирович – *аспирант кафедры информатики Московского физико-технического института.*

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. E-mail: yuri@timenkov.ru

ФЕДОСОВ Дмитрий Витальевич – *кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры средств связи и информационной безопасности Омского государственного технического университета.*

644050, Омск, пр. Мира, д. 11. E-mail: geolab@list.ru

ХАРЛАМОВА Нэлли Артемьевна – *кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики Пермского национального исследовательского политехнического университета.*

614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29. Тел. (342)219-80-25, e-mail: nellia@dom.raid.ru

ХЛОПИН Сергей Владимирович – *доцент кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: hlserg@mail.ru

ХОДЫРЕВ Иван Александрович – *специалист IT-отдела ООО «Олимп».*

191167, Санкт-Петербург, ул. Исполкомская, д. 15. E-mail: kivan-mih@yandex.ru

ЦИКИН Игорь Анатольевич – *заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корп. 2. Тел. (812)552-61-89, e-mail: tsikin@mail.spbstu.ru

ШАМИН Павел Юрьевич – *доцент кафедры физики и прикладной математики Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, кандидат технических наук.*

600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87. Тел. (4922)479-947, e-mail: laser@vlsu.ru

ШВЕЦОВ Константин Владимирович – *профессор кафедры управления в социально-экономических системах Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат экономических наук, доцент.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ШИШКАЛОВ Андрей Владимирович – *преподаватель кафедры комплексного радиоэлектронного контроля космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.*

197110, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13. E-mail: av33797@rambler.ru

ЮСУПОВ Рафаэль Мидхатович – *член-корреспондент РАН, директор Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации.*

199178, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39. Тел. (812)328-33-11, e-mail: spiiran@iias.spb.su

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Федосов Д.В. МЕТОДИКА ВЫБОРА ВАРИАНТА ПОДСИСТЕМЫ СВЯЗИ В СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТНОГО МОНИТОРИНГА.

Рассмотрены вопросы построения подсистем передачи данных в системах мониторинга транспорта. Приведена методика выбора наиболее целесообразного с экономической точки зрения варианта построения данной подсистемы.

РАДИОСВЯЗЬ. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. МОНИТОРИНГ. ТРАНСПОРТ.

Давыдов А.Е. АПОСТЕРИОРНО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАФИКА В СЕТЯХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ.

Предложен апостериорно-вероятностный метод прогнозирования трафика в сетях с коммутацией пакетов, основанный на определении и использовании статистической зависимости между членами временного ряда. Метод целесообразно использовать при проявлении эффекта самоподобия.

Изложены процедуры определения минимального числа наблюдений, глубины прогнозирования, принятия решений при частично заполненной таблице.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАФИКА. ЭФФЕКТ САМОПОДОБИЯ. АПОСТЕРИОРНО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД. НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ.

Макаров С.Б., Рашич А.В. ФОРМИРОВАНИЕ И ПРИЕМ СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ СИГНАЛОВ С OFDM.

Предложен метод формирования спектрально-эффективных сигналов с OFDM с помощью ОБПФ и линейного преобразования входных символов канального алфавита. Данный метод можно реализовать с помощью цифрового устройства формирования сигналов с OFDM. Предложен метод приема спектрально-эффективных сигналов с OFDM, основанный на использовании решетчатого алгоритма представления сигналов.

СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫЕ СИГНАЛЫ. OFDM. АЛГОРИТМ ПРИЕМА. ВНЕПОЛОСНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ.

Шишкалов А.В., Медведев В.М. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ КОДИРОВАНИИ.

Рассмотрены принципы формирования сигналов с НКР, представлены фрагменты речевого сигнала в виде последовательности ИКМ-отсчетов и соответствующие им фрагменты кадров передачи сообщения на выходе кодера речи, выявлена последовательность двоичных символов на периоде кадра НКР, характеризующаяся стационарностью значений двоичных символов при передаче паузы речи.

СТАЦИОНАРНОСТЬ. НИЗКОСКОРОСТНОЕ КОДИРОВАНИЕ РЕЧИ. ИНФОРМАТИВНЫЙ ПРИЗНАК.

Константинов Ю.А., Крюков И.И., Поскребышев М.М., Харламова Н.А. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СБОР ДАННЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ НА ЭТАПАХ ПРОИЗВОДСТВА.

Описаны методики автоматизации производства и исследования специальных волоконных световодов типа «Панда». Продемонстрировано комплексное применение методик, ведущее к уменьшению общего времени производственного цикла и измерений за счет увеличения роли машинной интерпретации результатов.

АВТОМАТИЗАЦИЯ. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО. ПРОИЗВОДСТВО.

Бендерская Е.Н., Никитин К.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ АКТИВНОСТИ МОЗГА И БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ.

Изучены вопросы моделирования рекуррентных нейронных сетей из элементов, модели которых приближены к биологическим нейронам. Показано место таких сетей среди множества подходов к моделированию нейронной активности мозга. Представлено разработанное средство моделирования импульсных рекуррентных нейронных сетей с неустойчивой динамикой, относящихся к резервуарным вычислителям.

РЕКУРРЕНТНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ. БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. РЕЗЕРВУАРНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. НЕУСТОЙЧИВАЯ ДИНАМИКА.

Романов Р.И., Коротков А.С. ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СТАТИЧЕСКОЙ ЗАПОМИНАЮЩЕЙ ЯЧЕЙКИ С ПОНИЖЕННОЙ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТЬЮ.

Рассмотрена двухвходовая ячейка накопителя статического оперативного запоминающего устройства с пониженным энергопотреблением. Предложено схемотехническое решение, позволяющее повысить помехоустойчивость триггера за счет введения дополнительной общей шины.

ОПЕРАТИВНОЕ ЗАПОМИНАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО. ЗАПОМИНАЮЩАЯ ЯЧЕЙКА. ТРИГГЕР. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ.

Ильюшин Ю.В. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ.

Предложена методика расчета оптимального расположения нагревательных элементов в туннельной печи конвейерного типа. Дано теоретическое обоснование данной методики. Приведен расчет месторасположения нагревательных элементов для гексагональной карбидокремниевой структуры нагревательных стержней.

УПРАВЛЕНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ. УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ. СЕКЦИОННЫЙ НАГРЕВАТЕЛЬ. ФУНКЦИЯ ГРИНА.

Власов А.В., Кузнецова Э.М., Николаенко Ю.В. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО КЛАПАНА И ВОЛНОВОГО НАСОСА С МАГНИТОЖИДКОСТНЫМ СЕНСОРОМ.

Рассмотрены вопросы расчета статических и динамических характеристик элементов с магнитожидкостными сенсорами. Изучена центроперфическая динамика магнитожидкостного сенсора.

МАГНИТОЖИДКОСТНЫЙ СЕНСОР. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ КЛАПАН. ВОЛНОВОЙ НАСОС. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ.

Григоров А.С. ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ КАРТОТЕЧНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ МЕТАДАННЫХ.

Представлен метод быстрой разработки картотечных информационных систем, заключающийся в использовании предметно-ориентированного языка программирования, применяемого для описания объектов предметной области и набора шагов, выполняющих трансляцию абстрактных моделей в готовые к использованию приложения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ЯЗЫК ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Васильев А.Е., Донцова А.В., Мурго А.И. АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СРЕДСТВ НЕЧЕТКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОГО УПРАВЛЕНИЯ.

Проведен анализ особенностей построения алгоритмов нечетких вычислений для встраиваемых систем управления на основе микроконтроллеров. Предложены новые подходы к разработке алгоритмов нечеткого логического вывода для встраиваемых микроконтроллерных устройств, обеспечивающие улучшение показателей качества функционирования по сравнению с известными решениями.

ВСТРАИВАЕМАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. НЕЧЕТКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. МИКРОКОНТРОЛЛЕР.

Зиновьев И.И., Шамин П.Ю. ОБНАРУЖЕНИЕ ЛИЦ ЛЮДЕЙ В СИСТЕМАХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ.

Задача обнаружения лиц людей в видеопотоке высокого разрешения в реальном времени актуальна для современных систем видеонаблюдения. Предложено решение данной проблемы с использованием возможностей графических ускорителей. Приведены результаты испытаний полученной программной реализации в реальных условиях.

ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЕ. ОБНАРУЖЕНИЕ ЛИЦ. ГРАФИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ. NVIDIA CUDA. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Брык И.Ю., Кетов Д.В., Купреенко С.В. ДИНАМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ ПРОГРАММ И ПРОЦЕССОВ МЕЖСЕТЕВЫХ ЭКРАНОВ.

Рассмотрен новый подход к решению задачи обеспечения безопасности функционирования межсетевых экранов на основе контроля целостности программ и процессов. Предложены модели и способы реализации статического и динамического контроля целостности, основанные на проактивных и реактивных механизмах на уровне ядра встроенной операционной системы.

ЦЕЛОСТНОСТЬ. ДИНАМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ. МЕЖСЕТЕВЫЕ ЭКРАНЫ.

Мещеряков С.В., Иванов В.М., Бортяков Д.Е. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЧЕТА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

Представлена информационная система учета технического состояния грузоподъемного и других видов производственного оборудования. Важное преимущество системы – интеграция характеристик различных видов оборудования всех предприятий в единой базе данных накопления и анализа информации.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЕ. ГРУЗОПОДЪЕМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. БАЗА ДАННЫХ.

Захаревич Н.В., Иванов Д.И., Цикин И.А. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГАЗОФАЗНОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР ПРИ СЕТЕВОМ ДОСТУПЕ К КЛАСТЕРНОМУ ВЫЧИСЛИТЕЛЮ.

Рассмотрены вопросы визуализации результатов моделирования процессов газофазной динамики при синтезе наноразмерных структур, полученные в результате моделирования с использованием высокопроизводительного кластерного вычислителя в условиях коллективного доступа. Сделан акцент на особенности взаимодействия программного модуля визуализации со специализированной средой моделирования при помощи обмена данными в формате TecPlot. Приведены примеры визуализации.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ. УДАЛЕННЫЙ ДОСТУП. КЛАСТЕР. НАНОТЕХНОЛОГИИ. ГАЗОФАЗНЫЙ СИНТЕЗ.

Мещеряков С.В., Иванов В.М., Бортяков Д.Е. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ.

Проанализированы дефекты грузоподъемных кранов и крановых путей на основе многолетней практики их промышленной эксплуатации на различных предприятиях Северо-Западного региона России. Накопленная статистика неисправностей и их причин использована в системе автоматизированного проектирования с целью предотвращения внеплановых выходов из строя и продления срока службы грузоподъемного оборудования.

БАЗА ДАННЫХ. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ ДЕФЕКТ. ГРУЗОПОДЪЕМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ.

Болдырев Ю.Я., Замотин К.Ю., Петухов Е.П. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА НАНОПЛЕНОК МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ.

Описана разработка и апробация технологий математического моделирования с использованием высокопроизводительных вычислений в области процессов газофазного синтеза наноразмерных структур и наноматериалов с целью изучения и обеспечения визуализации протекающих физико-химических процессов.

НАНОИНДУСТРИЯ. ГАЗОФАЗНЫЙ СИНТЕЗ НАНОМАТЕРИАЛОВ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.

Арсеньев Д.Г., Иванов В.М., Берковский Н.А. ЭФФЕКТИВНЫЙ ВЫБОР ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ СЕТКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О СЛЕЖЕНИИ ПО АЗИМУТУ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО.

Рассмотрено применение модификации метода выборки по важности для байесовского оценивания к задаче слежения по азимуту. Проведено сравнение предлагаемого метода с методами, обычно используемыми для решения аналогичных задач.

МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО. ВЫБОРКА ПО ВАЖНОСТИ. СЛЕЖЕНИЕ ПО АЗИМУТУ. БАЙЕСОВСКАЯ ОЦЕНКА.

Ильясов Б.Г., Дегтярева И.В., Макарова Е.А., Карташева Т.А. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ИНВЕСТИЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.

Предложены интеллектуальные алгоритмы принятия решений при управлении инвестиционным процессом макроэкономической системы, представленные нейросетевыми алгоритмами классификации макроэкономических ситуаций и продукционными правилами принятия решений. Применены методы имитационного моделирования, нейросетевых технологий и инженерии знаний. Проведены экспериментальные исследования эффективности предложенных интеллектуальных алгоритмов.

МАКРОЭКОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ. ПРОДУКЦИОННЫЕ ПРАВИЛА. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Антышев Е.П., Тименков Ю.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ БУФЕРИЗАЦИИ КОДА.

Рассмотрено влияние буферизации кода на производительность процессора, полученные результаты использованы для уточнения макроскопической модели расчета динамического поведения нагруженной системы. Авторами поставлены тестовые эксперименты, позволяющие написать количественные характеристики для производительности загрузчика инструкций. Полученные результаты использованы для пересчета профилей потребности в ресурсах в рамках модели.

МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ. МИКРОАРХИТЕКТУРА. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ.

Васильева Т.П., Мызникова Б.И., Русаков С.В. О ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГРАДООБРАЗОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ.

Исследована зависимость в распределении населения по городам, представленная в виде модели клеточного автомата. Показаны результаты имитационного моделирования развития территорий, полученные с помощью рассмотренной модели. Данные по результатам компьютерного моделирования сопоставлены с реальными данными.

КЛЕТОЧНЫЙ АВТОМАТ. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. РАЗВИТИЕ ГОРОДА. ЗАКОН ЦИПФА. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ.

Козелецкая Т.А., Герман Е.А., Дмитриев А.Г. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАРДИНАЛИСТСКОЙ ПОЛЕЗНОСТИ.

Рассмотрены некоторые методологические вопросы, касающиеся математического моделирования. Получена количественная связь между полезностью и количеством потребляемых благ, представленных в безразмерных переменных. Получены аналитические выражения для кривых постоянных полезностей и кривых безразличия для взаимозаменяемых благ.

ПОЛЕЗНОСТЬ. УРАВНЕНИЕ КАРДИНАЛИСТСКОЙ ПОЛЕЗНОСТИ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЕЗНОСТИ. УРАВНЕНИЕ ПОЛЕЗНОСТИ В БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ.

Жуков К.Г. АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ФОРМУЛАМ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ РУНГЕ–КУТТА.

Рассмотрены проблемы, связанные с организацией параллельных вычислений по формулам Рунге–Кутта численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассмотрены принципы реализации параллельных решателей.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ФОРМУЛЫ. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. ВЕКТОРНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ. МОДЕЛИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ.

Козлов В.Н., Хлопин С.В. РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИМИ ОБЪЕКТАМИ.

Рассмотрены проблемы синтеза термостабилизирующих управлений для распределенных многослойных объектов на основе использования разностных схем для численного решения дифференциального уравнения теплопроводности для трехмерного случая.

УПРАВЛЕНИЕ. ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ. РАЗНОСТНАЯ СХЕМА. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ.

Медведев А.В., Победаш П.Н. ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

Описаны основные этапы и примеры использования операционного подхода для исследования экономических систем, описываемых в классе многокритериальных многошаговых задач линейного программирования; перечислены результаты, получаемые на основе указанного подхода: доказательство разрешимости, оценки на управляющие переменные и критерии, достаточные условия неэффективности соответствующих инвестиционных проектов.

ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ПРОЕКТ. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ МНОГОШАГОВАЯ ЗАДАЧА ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.

Пархоменко В.А., Швецов К.В. АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

Рассмотрены модели специалистов, методики оценки человеческих ресурсов, использован аппарат логики антонимов. Даны методические подходы к автоматизации и рекомендации.

ЛОГИКА АНТОНИМОВ. МОДЕЛЬ И ПОРТРЕТ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА. СОЦИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ. МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗАЦИИ ОЦЕНКИ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ РЕСУРСОВ.

Иванов М.В., Матвеев А.В. КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМ РИСКОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СРЕДСТВ АВАРИЙНОЙ ЭВАКУАЦИИ.

Рассмотрен подход к оцениванию эффективности управления пожарной безопасностью в здании. Обосновано применение спасательных средств эвакуации с высоты с целью обеспечения нормативного значения величины индивидуального пожарного риска в здании.

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. РИСК. ЭВАКУАЦИЯ. СПАСАТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА.

Ходырев И.А., Попова С.В. СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ PROCESS MINING ДЛЯ ЗАДАЧИ ПОИСКА МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ.

Проведено численное сравнение результатов трех алгоритмов process mining для извлечения моделей процессов из журналов событий: α, генетического и эвристического алгоритмов. Эксперименты проведены как на синтетических, так и на реальных данных.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ. ЖУРНАЛЫ СОБЫТИЙ. ЧИСЛЕННОЕ СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ. МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ. ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ. ЭВРИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ. α-АЛГОРИТМ.

Ветринский Ю.А. КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ НА БАЗЕ ШТАТНОЙ LMS.

Представлена концепция построения интеллектуальных систем контроля результатов обучения на базе штатных средств тестирования систем управления обучением, расширенных средствами математических пакетов, поддерживающих работу со знаниями, – операции с лингвистическими переменными и логический вывод на нечетких правилах. Показан пример функционирования пилотного прототипа такой системы, созданного на основе комплексирования системы управления обучением Moodle с пакетом расширения MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.

АДАПТИВНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА. КОНТРОЛЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ. ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННАЯ. НЕЙРОННАЯ СЕТЬ. НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА. ПРАВИЛА ПРОДУКЦИЙ. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ.

Юсупов Р.М. ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАТИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ.

Рассмотрен вклад ученых, специалистов и отдельных организаций Санкт-Петербурга в развитие информатики и информационных технологий в России. Проанализировано развитие в городе высшего образования в этих областях.

ИНФОРМАТИКА. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.

ANNOTATION

KEYWORDS

Fedosov D.V. METHOD OF CHOICE OF TELECOMMUNICATION SYSTEM VARIANT FOR TRANSPORT MONITORING.

The theme of communication systems creation for transport monitoring is considered on article. The method of choice the most efficient system is shown.

RADIO COMMUNICATION. TELECOMMUNICATION SYSTEMS. TRANSPORT MONITORING.

Davydov A.E. A POSTERIORI-PROBABILISTIC METHOD OF TRAFFIC FORECASTING IN PACKET SWITCHING NETWORKS.

A posteriori-probabilistic method of traffic forecasting in packet switching networks based on determination and application on statistical dependency between the temporary row terms. The method is appropriate for self-similar effect.

The article gives the procedures of estimating minimal number of examinations, forecast depth, decision making on condition of partly filled tables.

FORECAST DEPTH. SELF-SIMILAR EFFECT. A POSTERIORI-PROBABILISTIC METHOD. NOT PARAMETRIC METHODS OF FORECASTING.

Makarov S.B., Rashich A.V. GENERATION AND RECEPTION OF SPECTRALLY EFFICIENT OFDM-SIGNALS.

The method of spectral-efficient signals generation with OFDM by means of IFFT and linear transformation of input symbols of the channel alphabet is offered. The offered method can be realized by means of the digital device of signals generation. The method of reception of spectral-efficient signals with OFDM, based on use of trellised algorithm of representation of signals is offered.

SPECTRAL-EFFFICIENT SIGNALS. OFDM. ALGORITHM OF RESEPTION. SPURIOUS RADIATIONS.

Shishkalov A.V., Medvedev V.M. PECULIAR PROPERTIES MANIFESTATION STRUCTURE-STATISTICAL SIGNS SPEECH SIGNALS BY SLOW-SPEED CODING.

In clause examination foundations formation of speech signals, represent fragments of speech signals as consecution PCM-symbols and corresponding fragments data frame in speech coder destination, defect consecution bits on period of kadr speech coder, characterizing stationarity bits meaning by speech pause transmission.

STATIONARITY BITS MEANING. SLOW-SPEED CODING. INFORMATIVE SIGN.

Konstantinov Yu.A., Kryukov I.I., Poskrebishev M.M., Harlamova N.A. AUTOMATED DATA COLLECTION DURING THE PROCESS OF OPTICAL FIBERS PERFORMANCE INVESTIGATION ON THEIR PRODUCTION STAGES.

Methods designed to automate special Panda-type optical fibers production and their performance studies are presented here. We demonstrate complex application of these methods that leads to production and measuring time reduction due to automatic results interpretation role increasing.

AUTOMATION. AUTOMATION OF RESEARCH. OPTICAL FIBER. PRODUTION.

Benderskaya E.N., Nikitin K.V. MODELLING NEURAL ACTIVITY OF BRAIN AND BIO-INSPIRED COMPUTING.

Recurrent neural networks with biological neuron models are under consideration. Comparative analysis of bio-inspired recurrent neural networks with other approaches applicable to model neural activity is provided. Reservoir computing software is developed to model recurrent networks with unstable dynamics of spikes.

RECURRENT NEURAL NETWORK. BIO-INSPIRED COMPUTING. RESERVOIR COMPUTING. UNSTABLE DYNAMICS.

Romanov R.I., Korotkov A.S. STATIC NOISE MARGINE IMPROVING OF DUAL-SELECTIVE SRAM CELL.

In this paper considered schematic of dual-selective SRAM cell with low power consumption. The method for improving SNM was proposed.

SRAM. MEMORY CELL. TRIGGER. NOISE MARGIN.

Ilyushin Yu.V. METHOD OF CALCULATING OPTIMAL NUMBER OF HEATERS BASED ON TEMPERATURE FIELD VALUES.

A method of calculating optimal allocation of heaters in a pipeline tunnel furnace is introduced. Paper includes theoretical rationale of the proposed method, as well as the calculation of the heaters allocation for hexagonal silicon carbide heating rod structure.

CONTROL. MATHEMATICAL MODELLING. TEMPERATURE FIELD. CONTROL. SECTIONAL HEATER. GREEN'S FUNCTION.

Vlasov A.V., Kuznetsova E.M., Nikolaenko Yu.V. STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS ELECTRO-VALVE AND PUMP WAVE PATTERNS MAGNETO SENSOR.

The questions of the calculation of static and dynamic characteristics of the elements with magneto sensors. Consider center – periphery dynamic magneto sensor.

MAGNETO SENSOR. ELECTRO-VALVE WAVE PUMP. HYDRAULIC RESISTANCE. TRANSFER FUNCTION.

Grigorov A.S. FILING INFORMATION SYSTEMS DEVELOPMENT APPROACH BASED ON DOMAIN-SPECIFIC METADATA MODEL.

This paper presents a method for rapid development of filing information systems. The approach consists in using special domain-specific programming language, used for representing the domain objects, and set of special steps, that translate the abstract object models to applications, that ready to use.

MODELLING. INFORMATION SYSTEMS. DOMAIN-SPECIFIC PROGRAMMING LANGUAGE.

Vassiliev A.E., Dontsova A.V., Murgo A.I. FUZZY COMPUTATIONS ALGORITHMS FOR MCU-BASED INTELLIGENT EMBEDDED CONTROL SYSTEMS.

A problem of design of MCU-based fuzzy computations algorithms is analized. New approaches, quality metrics and fuzzy computations examples are discussed.

INTELLIGENT EMBEDDED CONTROL SYSTEM. FUZZY COMPUTATIONS. MICROCONTROLLER.

Zinoviev I.I., Shamin P.Yu. FACE DETECION IN VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS.

The problem of real-time face detection in high-resolution video stream is relevant for today's video surveillance systems. The original solution of the problem with the use of the graphics accelerators compute capabilities is proposed. The tests of the resulting software implementation in the real world are shown.

CCTV. FACE DETECTION. GRAPHICS ACCELERATORS. NVIDIA CUDA. OPTIMIZATION.

Bryk I.Yu., Ketov D.V., Kupreenko S.V. DYNAMIC CONTROL OF PROGRAM AND PROCESS INTEGRITY OF NETWORK FIREWALLS.

This article considers the new approach to the problem of ensuring safety of the firewall on the basis of integrity programs and processes. It proposes models and approaches how to implement static and dynamic integrity, based on proactive and reactive mechanisms at the kernel level of the operating system built-in into the firewall.

INTEGRITY. DYNAMIC CONTROL. NETWORK FIREWALLS.

Mescheryakov S.V., Ivanov V.M., Bortyakov D.E. AUTOMATED EXPERTISE SYSTEM OF LIFTING EQUIPMENT OPERATING CONDITIONS.

Information system for operating conditions expertise of lifting and other production equipment is presented. Storing and analyzing the equipment specifications of various enterprises in the integrated database is the important advantage of information system.

INFORMATION SYSTEM. TECHNICAL EXPERTISE. LIFTING EQUIPMENT. DATABASE.

Zakharevich N.V., Ivanov D.I., Tsikin I.A. THE VISUALIZATION OF MODELLING NANOSTRUCTURES GAS-PHASE SYNTHESES IN AN EVIRONMENT OF NETWORK ACCESS TO THE COMPUTING CLUSTER.

The article is about visualization of modeling gas-phase dynamics in the synthesis of nanostructures, which were obtained by simulation using HPC cluster in an environment shared access. The article is focused on the features of the interaction of software modules with the specialized visualization modeling environment through the exchange of data by using TecPlot format. The article contains an examples of this visualization.

VISUALISATION. REMOTE ACCESS. HPC CLUSTER. NANOTECHNOLOGIES. GAS-PHASE SYNTHESIS.

Mescheryakov S.V., Ivanov V.M., Bortyakov D.E. ANALYSIS OF OPERATING DEFECTS OF LIFTING EQUIPMENT IN COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM.

Operating defects of lifting machines and crane ways are analyzed based on industrial operation activity of various enterprises in the north-west region of Russia. Aggregate statistics of defect cause is used in computer-aided design system to prevent emergency outage and to extend lifetime of lifting equipment.

DATABASE. OPERATING DEFECT. LIFTING EQUIPMENT. COMPUTER-AIDED DESIGN.

Boldyrev Yu.Ya., Zamotin K.Yu., Petukhov E.P. MODELLING OF CHEMICAL VAPOR DEPOSITION FOR GROWTH OF THIN FILMS.

At the base of the work lies the development and testing of mathematical models using high-performance computing in the processes of gas-phase synthesis of nanostructures and nanomaterials in order to study and provide visualization of proceeding physical and chemical processes.

NANOTECHNOLOGY INDUSTRY. GAS-PHASE SYNTHESIS NANOMATERIALS. SIMULATION. GAS DYNAMICS. PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES.

Arseniev D.G., Ivanov V.M., Berkovskiy N.A EFFECTIVE CHOICE OF P.D.F. IN SOLVING BEARING-ONLY PROBLEM BY MONTE-CARLO METHOD.

The paper are devoted the modification of the important sampling devised by the authors as applied to bearing-only problem in 2D-space. The method is compared with the classic important sampling method and the bootstrap filter, that are usually used for this problem solving.

MONTE-CARLO METHOD. BAYESIAN ESTIMATE. BEARING-ONLY. TRACKING.

Ilyasov B.G., Degtyareva I.V., Makarova E.A., Kartasheva T.A. INTELLIGENT DECISION-MAKING ALGORITHMS AT MACROECONOMIC SYSTEM INVESTMENT PROCESS MANAGEMENT.

Intelligent decision-making algorithms of macroeconomic system investment process management are submitted in the article. These algorithms are presented by network algorithms of macroeconomic situations' classification and decision making productional rules, obtained on the base of simulation modeling, network technologies and knowledge engineering. The experimental investigations of proposed intelligent algorithms effectiveness were made.

MACROECONOMIC SYSTEM. INVESTMENT PROCESS. NETWORK ALGORITHMS. PRODUCTIONAL RULES. DYNAMIC MODEL.

Antyshev E.P., Timenkov Yu.V. MODELLING OF CALCULATION RESOURCES DISTRIBUTION WITH ALLOWANCE FOR PROCESSOR'S INSTRUCTION CACHING.

Article is devoted to the allowance for front-end's part in processor performance and adjustment of the model for calculation of dynamic behavior of loaded system on this basis. Authors have conducted tests for establishing quantitative characteristics of processor's front-end performance. Obtained results have been used in recalculation of resource profiles from model.

MODELLING. PERFORMANCE. MICROARCHITECTURE. RESOURCES DISTRIBUTION.

Vasilyeva T.P., Myznikova B.I., Rusakov S.V. ABOUT POSSIBILITY OF URBAN DEVELOPMENT MODELLING BY MEANS OF CELLULAR AUTOMAT.

In this paper, dependence in population distribution on cities, which is presented in the form of cellular automat model is investigated. Results of imitating modeling of urban development, received by means of the considered model are shown. The data by results of computer modeling is compared with the real data.

CELLULAR AUTOMAT. IMITATING MODELLING. URBAN DEVELOPMENT. ZIPF'S LAW. POPULATION DISTRIBUTION.

Kozeletskaya T.A., Herman E.A., Dmitriev A.G. MATHEMATICAL MODEL OF THE CARDINAL UTILITY.

Discuss some of the methodological issues related to mathematical modeling. Obtained quantitative relationship between utility and quantities of consumption goods, represented in dimensionless variables. Analytical expressions for the traces of permanent utilities and the indifference curves for interchangeable goods.

UTILITY. EQUATION OF CARDINAL UTILITY. MATHEMATICAL MODEL OF A UTILITY. EQUATION UTILITY IN DIMENSIONLESS VARIABLES.

Zhukov K.G. PARALLEL COMPUTING ALGORITHM ON THE BASE OF RUNGE–KUTTA NUMERICAL INTEGRATION EQUATIONS.

Problems of parallel computing based on Ringe-Kutta ordinary differential equations numerical integration are reviewed. Principles of parallel solvers implementations are introduced.

NUMERICAL ANALYSIS. NUMERICAL INTEGRATION. PARALLEL COMPUTING. RUNGE–KUTTA METHOD. VECTOR COMPUTING. PARALLEL COMPUTING STRUCTURES. MODELLING SYSTEMS.

Kozlov V.N., Khlopin S.V. DIFFERENCE SCHEMES FOR THE SYNTHESIS OF NONLINEAR MANAGEMENT HAVING THERMALLY CONDUCTIVE OBJECTS.

Describes the problem of synthesis of thermo regulating managements for distributed multi-layer objects through the use of difference schemes for numerical solution of differential equation for the three-dimensional case.

TEMPERATURE STABILIZATION. DIFFERENCE SCHEME. DIFFERENTIAL EQUATION OF THERMAL CONDUCTIVITY.

Medvedev A.V., Pobedash P.N. APPLICATION OF OPERATIONAL APPROACH TO THE ANALYSIS OF ECONOMIC SYSTEMS.

This article describes the basic steps and examples of using the operational approach for the study of economic systems, described in the class of multicriterial task multi-step linear programming; lists the results obtained on the basis of this approach: proof of decidability, evaluation, control variables and criteria, sufficient conditions of the ineffectiveness of the relevant investment projects.

INVESTMENT PROJECT. MULTICRITERIAL MULTISTAGE LINEAR OPTIMAL CONTROL PROBLEM. ECONOMIC SYSTEMS.

Parhomenko V.A., Shvetsov K.V. AUTOMATED ASSESSMENT OF THE ACTIVE ELEMENTS OF SOCIOTECHNICAL SYSTEMS.

The models of the active elements, the methodologies of the evaluating of human resources and the antonyms logic are described in the article. The methodological approaches to automatization as well as recommendations are given in the scientific paper.

THE ANTONYM LOGIC. THE MODEL AND THE PORTRAIT OF THE ACTIVE ELEMENT. SOCIOTECHNICAL SYSTEMS. TRANSPORT LOGISTICS. THE SUGGESTIONS OF THE AUTOMATIC MODELLING OF HUMAN RESOURCES.

Ivanov M.V., Matveev A.V. CRITERION OF EFFICIENCY OF MANAGE BY FIRE RISK WITH APPLICATION OF EQUIPMENT OF EMERGENCY EVACUATION.

In this article authors consider the approach to estimate the effectiveness of management of fire safety in the building. Also they substantiated the application of rescue equipment of evacuation from a height for ensuring a normative values of the individual risk of fire in the building.

FIRE SAFETY. RISK. EVACUATION. RESCUE EQUIPMENT.

Khodyrev I.A., Popova S.V. QUANTITATIVE COMPARISON OF BASIC PROCESS MINING ALGORITHMS.

In presented paper authors commit quantitative comparison of three process mining algorithms: α, genetic and heuristic, for task of process model extraction from log files. Experiments are based on both synthetic and real log data. Criteria for comparison are: average work time, resulting model fitness and resulting model behavioral appropriateness.

PROCESS MINING. LOG. QUANTITATIVE COMPARISON OF ALGORITHMS. PROCESS MODELS. GENETIC ALGORITHM. HEURISTIC ALGORITHM. α-ALGORITHM.

Vetrinsky Yu.A. THE CONCEPT OF INTELLECTUAL KNOWLEDGE MONITORING SYSTEM BASED ON THE REGULAR LMS.

The article presents the concept of intellectual knowledge monitoring systems building based on regular testing wear of learning management systems, advanced by means of mathematical packages, that supports the operations with knowledge, such as linguistic variables and fussy rules inference. An example of the operation of the such system pilot prototype, created by aggregation of Moodle learning management system with MATLAB expansion package Fuzzy Logic Toolbox, is shown.

ADAPTIVE TESTING. INTELLECTUAL SYSTEM. LEARNING RESULTS CONTROL. LINGUISTIC VARIABLE. NEURAL NETWORK. FUZZY LOGIC. PRODUCTION RULES. LEARNING MANAGEMENT SYSTEM.

Yusupov R.M. FROM THE HISTORY OF COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGIES DEVELOPMENT IN ST. PETERSBURG.

This paper reviews a contribution made by St. Petersburg scientists, specialists and some institutions to computer science and information technologies development in Russia.

Development of the city higher education in the above areas is analyzed additionally.

COMPUTER SCIENCE. COMPUTER SYSTEMS. INFORMATION TECHNOLOGIES.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 6–2 (138) 2011

Том 2

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция журнала

канд. техн. наук, д-р экон. наук, профессор *А.В. Бабкин* – научный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции 552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 26.12.2011. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,18. Уч.-изд. л. 24,18. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.