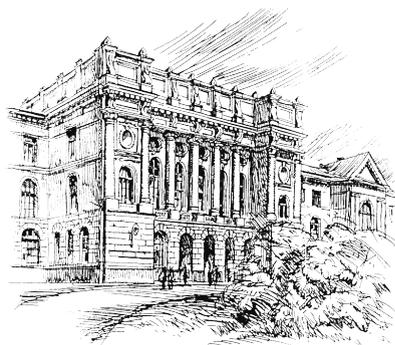


1(115)/2011



# Научно-технические ведомости СПбГУ

ИНФОРМАТИКА.  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ.  
УПРАВЛЕНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки

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); *Юсунов Р.М.*, чл.-кор. РАН.

## СЕРИЯ “ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ”

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

*Юсунов 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

*Юсунов 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;  
*Давыденко М.О.*, 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, 2010



# Содержание

## Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

<b>Гребенкин М.К., Поршнева С.В.</b> Влияние активности пользователей сети Интернет на свойства мультисервисного трафика .....	7
--	---

## Проблемы передачи и обработки информации

<b>Аксенов К.А., Антонова А.С., Спицина И.А.</b> Анализ и синтез процессов преобразования ресурсов на основе имитационного моделирования и интеллектуальных агентов .....	13
<b>Трифонов П.В.</b> Применение списочного декодирования в задаче классификации текстовых документов .....	20
<b>Тюрин С.Ф., Греков А.В., Громов О.А.</b> Функционально-полный толерантный элемент .....	24

## Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства

<b>Марчук В.И., Воронин В.В., Франц В.А.</b> Модифицированный метод восстановления двумерных сигналов .....	31
---	----

## Системный анализ и управление

<b>Каримов Т.Н., Симонова Л.А.</b> Интеллектуальная система поддержки принятия решения для оперативного управления транспортными потоками .....	37
<b>Аксенов К.А. Сафрыгина Е.М., Доросинский Л.Г.</b> Расширение интеллектуальных средств поддержки принятия решений и имитационного моделирования нечеткой логикой .....	42

## Управление в социальных и экономических системах

<b>Денисова А.А., Филатов И.Н.</b> Анализ влияния рыночного механизма на повышение конкурентоспособности продукции .....	49
<b>Нестерова Е.И.</b> Формирование структуры выходных квалитетических характеристик кинематографической системы .....	55
<b>Кузнецова О.К., Мейер М.В., Осадчий А.И.</b> Методический инструментарий для управления экономикой предприятия связи .....	60

## Вычислительные машины и программное обеспечение

<b>Мадорская Ю.М.</b> Формирование оценки изменений программного обеспечения АСУП .....	65
<b>Бородин А.М., Поршнева С.В.</b> О параллельном построении пространственных индексов основной памяти в OLAP-системах .....	72
<b>Курочкин Л.М.</b> Вопросы интеграции информационного обеспечения САД систем предприятия .....	75

## Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

<b>Арсеньев Д.Г., Иванов В.М., Берковский Н.А.</b> Навигация по расстояниям до точечных ориентиров адаптивным методом существенной выборки .....	81
<b>Ильясов Б.Г., Дегтярева И.В., Макарова Е.А., Карташева Т.А.</b> Динамическое моделирование неравновесных процессов взаимодействия рынков благ и денег .....	87
<b>Нестерова Е.И.</b> Использование интегральных критериев при решении квалитетических задач .....	94
<b>Хворова Л.А., Топаж А.Г.</b> Построение моделей агроэкосистем и их адаптация к конкретным условиям .....	99
<b>Матвеев В.А.</b> Конусная оптимальность в игровой динамической задаче с векторными выигрышами .....	105
<b>Ляшенко А.Л., Золотов О.И.</b> Математическое моделирование распределенного объекта управления с подвижным источником воздействия .....	113

<b>Со И.А., Малыхина Г.Ф.</b> Измерение цветовых различий на основе модели цветовосприятия.....	118
<b>Чередниченко В.Г., Цуприков А.А.</b> Возникновение крутильных автоколебаний в бурильной колонне.....	123
<b>Аксенов К.А., Ван Кай</b> Задача свертки имитационной модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов.....	126
<b>Васильев А.Н., Порубаев Ф.В., Тархов Д.А.</b> Нейросетевой подход к решению некорректных задач теплопереноса.....	133

#### **Приборы, информационно-измерительные системы**

<b>Антонов В.И., Загайнов А.И., Коваленко А.Н., Ву ван Куанг.</b> Аппаратно-программный комплекс энтропийно-динамического мониторинга кардиоритма.....	143
<b>Антонов В.Ф.</b> Исследование динамических характеристик регулятора прямого действия.....	150
<b>Бостонов О.Х.</b> Средства автоматизации проектирования для интеграции информационных систем .....	154

#### **Электроника, технологии производства материалов электронной техники**

<b>Коротков А.С., Морозов Д.В.</b> Нанoeлектроника – основа компонентной базы современной радиотехники .....	159
<b>Пщелко Н.С. Ханин С.Д., Немов С.А.</b> Физические основы методов диагностики и управления свойствами металлodieлектрических структур оксидных конденсаторов .....	167
<b>Эбанга А., Тарханов В.И.</b> Устройства на основе ферритовых колец с различной геометрией катушек.....	172
<b>Купцов В.Д., Кянджециан Р.А., Кателевский В.Я., Валюхов В.П.</b> Светорассеяние аэрозольными частицами в газоанализаторах на молекулярных ядрах конденсации .....	178

#### **Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании**

<b>Маркелова А. В.</b> Управление образовательной программой с использованием системы поддержки принятия решений .....	187
Научный семинар .....	193
Сведения об авторах.....	194
Аннотации.....	198



# Contents

## Telecommunications systems and computer networks

<b>Grebenkin M.K., Porshnev S.V.</b> <i>Influence of internet users activity patterns on self-similar properties of the traffic</i> .....	7
---	---

## Problems of transfer and information processing

<b>Aksyonov K.A., Antonova A.S., Spitsina I.A.</b> <i>Analysis and synthesis processes of transformation of resource-based simulations and intelligent agents</i> .....	13
<b>Trifonov P.V.</b> <i>Application of list decoding to the problem of automatic text categorization</i> .....	20
<b>Tyurin S.F., Grekov A.V., Gromov O.A.</b> <i>Functionally-complete tolerant element</i> .....	24

## Radio engineering, aerials, SHF-devices

<b>Marchuk V.I., Voronin V.V., Franz V.A.</b> <i>Modified approach for image reconstruction of two dimensional signals</i> .....	31
--	----

## The system analysis and management

<b>Karimov T.N., Simonova L.A.</b> <i>Intelligent decision support system for operational management of traffic flows</i> .....	37
<b>Aksyonov K.A., Safrygina E.M., Dorosinskiy L.G.</b> <i>Extension of intellectual decision-making support tools and simulation for fuzzy logic</i> .....	42

## Management in social and economic systems

<b>Denisova A.A., Filatov I.N.</b> <i>Analysis of the market influence on raise competitiveness of the products</i> ....	49
<b>Nesterova E.I.</b> <i>System structure forming of output qualimetric characteristics of cinematographic system</i> .....	55
<b>Kuznetsova O.K., Meyer M.V., Osadchy A.I.</b> <i>Methodological tools for economic management of communication enterprise</i> .....	60

## Computers and the software

<b>Madorskaya J.M.</b> <i>Formation of evaluation software changes in MIS</i> .....	65
<b>Borodin A.M., Porshnev S.V.</b> <i>On parallel construction of multidimensional in-memory indices in olap systems</i> .....	72
<b>Kurochkin L.M.</b> <i>Integration of informational support of the enterprise cad systems</i> .....	75

## Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

<b>Arseniev D.G., Ivanov V.M., Berkovskiy N.A.</b> <i>Applying the adaptive importance sampling method to the trilateration problem</i> .....	81
<b>Ilyasov B.G., Degtyareva I.V., Makarova E.A., Kartasheva T.A.</b> <i>Dynamic simulation of nonequilibrium processes of interaction of goods and money markets</i> .....	87
<b>Nesterova E.I.</b> <i>The use of integral criteria for solving qualimetric problems</i> .....	94
<b>Khvorova L.A., Topaj A.G.</b> <i>Building models of agro-ecosystems and their adaptation to specific conditions</i> .....	99
<b>Matveev V.A.</b> <i>Cone optimality in game dynamic problem with every player' vector payoffs</i> .....	105
<b>Lyashenko A.L., Zolotov O.I.</b> <i>Mathematical modelling of distributed object of control with mobile source of influence</i> .....	113
<b>So I.A., Malykhina G.F.</b> <i>Measuring color differences based on the color perception model</i> .....	118

<b>Cherednichenko V.G., Tsouprikov A.A.</b> <i>Genesis of twiner autooscillations in boring pillar</i> .....	123
<b>Aksyonov K.A., Wang Kai.</b> <i>The transformation task of simulation multi-agent model of resources conversion processes</i> .....	126
<b>Vasilyev A.N., Porubayev F.V., Tarkhov D.A.</b> <i>Neural networks approach to the solution of incorrect heat transfer problems</i> .....	133

#### **Devices, information-measuring systems**

<b>Antonov V.I., Zagaynov A.I., Kovalenko A.N., Vu van Quang.</b> <i>Hardware-software complex of dynamic-entropy monitoring of heart rate</i> .....	143
<b>Antonov V.F.</b> <i>Dynamic performance control of direct action</i> .....	150
<b>Bostonov O.H.</b> <i>Semiotic modeling workbenches for information system integration</i> .....	154

#### **Electronics, technologies of producing the materials of electronic technics**

<b>Korotkov A.S., Morozov D.V.</b> <i>Nanoelectronics as a component base of modern radioengineering</i> .....	159
<b>Pshchelko N.S., Khanin S.D., Nemov S.A.</b> <i>Physical basis for methods of diagnostics and improvement of metall-dielectric structures of oxide capacitors</i> .....	167
<b>Ebanga A., Tarkhanov V.I.</b> <i>Devices based on ferrite rings with different coils geometry</i> .....	172
<b>Kuptsov V.D., Kjandzhetsian R.A., Katelevski V.J, Valjukhov V.P.</b> <i>Light scattering by aerosol particles in gas analyzers based on molecular condensation nucleus effect</i> .....	178

#### **Information and telecommunication technologies in formation**

<b>Markelova A.V.</b> <i>Management of the educational using decision support system</i> .....	187
<i>Scientific seminar SPbSPU</i> .....	193
<i>About the authors</i> .....	194
<i>Abstracts</i> .....	198



# Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

УДК 004.942

*М.К. Гребенкин, С.В. Поршнев*

## **ВЛИЯНИЕ АКТИВНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СЕТИ ИНТЕРНЕТ НА СВОЙСТВА МУЛЬТИСЕРВИСНОГО ТРАФИКА**

При решении многих практических задач требуются образцы сетевого трафика (при оптимизации загрузки канала передачи, проверке алгоритмов управления потоками данных, обеспечения качества обслуживания клиентов, при исследовании сетевых аномалий и средств их своевременного обнаружения и т. д.). В связи с тем, что в перечисленных выше задачах информация о содержании передаваемых сообщений не требуется, здесь можно ограничиться рассмотрением трафика, используя данные о размере каждого из пакетов и принадлежности их к тому или иному протоколу.

Полную информацию о входящем трафике, теоретически, можно получить путем перехвата и последующей обработки реального трафика конкретной компьютерной сети или использования файлов из существующих архивов трафика. Очевидными недостатками данного (сугубо эмпирического) подхода являются:

невозможность изменения в процессе моделирования параметров трафика, что требуется при рассмотрении различных режимов работы сети и ее конфигураций;

за пределами рассмотрения остается процесс формирования трафика, знание особенностей которого открывает возможность оптимального конфигурирования сетей и управления их работой.

В этих условиях представляется целесообразным использовать имитационное моделирование для более детального изучения процесса формирования и передачи потоков данных по современным телекоммуникационным каналам, которые в ряде случаев оказываются эффективными инструментами решения задач обеспечения качества обслуживания клиентов сети Интернет и выбора необходимых параметров для настройки сетевого оборудования.

### **Постановка задачи**

В последнее время широкое распространение получили методы генерации «синтетического» трафика при помощи моделей, отличающихся друг от друга уровнем детализации (начиная с наиболее обобщенных формул и заканчивая генераторами, воссоздающими точные копии каждого из передаваемых в сеть пакетов). Основное требование, предъявляемое к трафику, полученному расчетным путем, очевидно: он должен быть максимально «похожим» на реальный трафик. В качестве количественной характеристики «похожести» систем обычно используют такие статистические свойства, как дисперсия, функция распределения и т. д. [1]. Априори можно ожидать, что согласованность данных показателей обеспечивает близость результатов моделирования прохождения пакетов с аналогичными показателями реальных современных сетей.

Одна из проблем моделирования трафика состоит в том, что в современных компьютерных сетях одновременно работает большое число (сотни) разных типов приложений [2], количество которых стремительно растет. Как следствие, на практике оказывается невозможным адекватно описать источники трафика, эквивалентные каждому из существующих приложений. В этой связи моделирование трафика на уровне явного описания каждого из конкретных приложений для современных высокоскоростных мультисервисных сетей представляется бесперспективным.

Отметим также, что известные пакетные симуляторы трафика (например, сетевой симулятор NS-2) можно использовать только для моделирования каналов с умеренной пропускной способностью (потоки порядка 100 Мбит/с). Для высокоскоростных Интернет-каналов в последние годы был предложен принципиально иной

подход – непрерывные (жидкостные) модели, в которых скорость поступления пакетов считается непрерывной функцией времени, а значение этой функции находится путем интегрирования (обычно – численного) системы дифференциальных уравнений.

Однако оказывается, что известные непрерывные модели трафика с упрощенным описанием источников трафика позволяют получить только грубые оценки его характеристик, например, не удастся понять истинные причины пульсаций интенсивности трафика в каналах передачи данных. Как следствие, не удастся ответить на вопрос о связи величины данных пульсации с количеством пользователей и их профилями.

Для описания поведения пользователей в терминах частоты отправки запросов, объемов передаваемой и получаемой информации в [2] была предложена абстрактная модель источников трафика. Ее ключевая идея состоит в том, чтобы рассматривать потоки, которыми обмениваются по сети приложения, не на уровне отдельных пакетов, а более укрупненно – на уровне «модулей данных приложений» (МДП).

Здесь принципиальное значение имеет то обстоятельство, что информация о параметрах МДП рассматривается безотносительно к конкретным сетевым программам (производится усреднение по всем активным приложениям). Это в свою очередь освобождает от необходимости моделировать работу конкретных приложений в отдельности. Использование данного метода описания источников минимизирует недостатки жидкостной модели трафика и расширяет ее применимость.

### Расчетная методика

В данной работе применена жидкостная модель трафика [2], в которой используются абстрактные сетевые источники, предложенные в [3].

В выбранной жидкостной модели скорость передачи данных считается непрерывной функцией времени, а значение этой функции находится путем интегрирования системы дифференциальных уравнений с запаздыванием [4], определяющей изменение со временем окна передачи данных по протоколу TCP по  $i$ -му потоку  $W_p$ , а также длины очереди  $q_l$  на входе  $l$ -го канала:

$$\frac{dW_i(t)}{dt} = \frac{h_{(W_i(t)-M_i)} - W_i(t)}{R_i(t)} \cdot \lambda_i(t),$$

$$\frac{dq_l(t)}{dt} = -h_{q(t)} \cdot C_l + \sum_{i \in N_l} n_i \cdot A_i^l(t),$$

где  $M$  – максимально допустимый размер окна;  $R_i$  – время прохождения (оборота) данных от сервера к клиенту и обратно (Round Trip Time);  $A_i^l(t)$  – скорость поступления пакетов  $i$ -го потока на вход  $l$ -го канала;  $C_l$  – пропускная способность  $l$ -го канала;  $h_{f(t)}$  – ступенчатая функция, определяющаяся соотношением:

$$h_{f(t)} = \begin{cases} 1, & \text{если } f(t) \geq 0, \\ 0, & \text{если } f(t) < 0. \end{cases}$$

Зависимость скорости сброса пакетов  $i$ -го потока можно представить в виде  $\lambda_i(t) = \sum_{l \in F_i} A_i^l(t_l) \cdot p_l(t_l)$ , где суммирование производится по всему пути прохождения сигнала,  $A_i^l(t_l)$  – скорость поступления данных  $i$ -го потока на  $l$ -й узел,  $p_l$  – вероятность сброса пакета.

В случае, если применяется предусмотренный некоторыми вариантами протокола TCP алгоритм быстрого восстановления окна после потери пакетов, реальную скорость потерь  $\lambda_i(t)$  следует заменить на эффективное значение  $\lambda'_i(t)$ . Последнее можно интерпретировать как скорость поступления сигналов на уменьшение окна (сигналом к уменьшению размера окна передачи принято считать потерю одного или более пакетов в передаваемом окне). Значение  $\lambda'_i(t)$  связано с реальной скоростью потерь  $\lambda_i(t)$  следующим соотношением [4]:

$$\lambda'_i(t) = \frac{1 - \left[ 1 - \frac{\lambda_i(t)}{A_i(t - R_i(t))} \right]^{R_i(t) \cdot A_i(t - R_i(t))}}{R_i(t)}.$$

Скорость отправки пакетов  $i$ -го потока из  $l$ -го узла описывается выражением:

$$D_i^l(t) = \begin{cases} A_i^l(t), & q_l(t) = 0, \\ \frac{A_i^l(t-d)}{\sum_{j \in N_l} A_j^l(t-d)} \cdot C_l, & q_l(t) > 0, \end{cases}$$

где  $d = \frac{q_l(t-d)}{C_l}$  – задержка в очереди на этом узле.

Скорость поступления пакетов  $i$ -го потока на  $l$ -й узел равна скорости отправления из предшествующего узла  $p_i(l)$ :

$$A_i^l(t) = \begin{cases} A_i(t), & l = k_{i,1}, \\ D_i^{p_i(l)}(t - a_{p_i(l)}), & l \neq k_{i,1} \end{cases}$$

где  $l = k_{i,1}$  обозначает конечный узел для  $i$ -го потока.

Если суммарный поток на входе в маршрутизатор  $\sum_{j \in N_l} A_j^l(t-d)$  превышает его пропускную способность  $C_l$ , то формируется очередь. При возникновении перегрузок на маршрутизаторе происходит сброс пакетов. Вероятность сброса пакета зависит от принятой политики предотвращения перегрузок. Например, при использовании алгоритма Drop Tail сброс пакетов происходит, если размер очереди превышает заданную длину буфера, следовательно, вероятность сброса пакетов на  $l$ -м узле можно представить в виде

$$p_{DT}^l(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } q_l(t_l) < q_{ml}, \\ 1 & \text{при } q_l(t_l) \geq q_{ml}, \end{cases}$$

чему соответствует полная скорость сброса пакетов

$$\lambda_{DT}^l(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } q_l(t_l) < q_{ml}, \\ A_l(t_l) & \text{при } q_l(t_l) \geq q_{ml}. \end{cases}$$

При этом сброс пакетов из разных потоков производится с вероятностью, равной относительноному вкладу данного потока в суммарный поток

$$\frac{A_i^l(t-d)}{\sum_{j \in N_l} A_j^l(t-d)}.$$

В настоящее время наибольшее распространение получил режим работы пользователей, при котором им обеспечивается гарантированный уровень скорости доступа к сети Интернет CAR (Committed Access Rate). При этом основным инструментом, регулирующим скорость доступа пользователей к сети Интернет, является механизм ограничения скорости (Rate Limit) [5]. В соответствии с данным механизмом на маршрутизаторе устанавливается согласованный размер всплеска  $BC$  (байт) – объем данных, которые можно передать, если скорость превысит заданное среднее значение. После превышения установленного уровня происходит сброс пакетов. Это в свою очередь приводит к снижению скорости передачи данных за счет алгоритма изменения окна передачи данных, реализованного в протоколе TCP. Данный алгоритм учтен в приведенных выше уравнениях жидкостной модели трафика, где зависимость счетчика всплеска описывается уравнениями, аналогичными уравнениям для очередей  $q_l(t)$ .

Начальные условия для приведенной выше системы дифференциальных уравнений определяются сценарием, по которому реализуется активность пользователей, т. е. источниками трафика. В данной статье рассмотрена одна из самых распространенных классификаций, разделяющих источники трафика на три типа (отметим, что сходная классификация рассматривается и в других работах, например [6, 7]).

1. Класс А. МДП  $\geq 10$  Мбайт – «слоны» (P2P, скачивание больших файлов по протоколу TCP). Время жизни таких потоков достаточно велико, несколько или более минут.

2. Класс В. МДП = 0,3–10 Мбайт – «мулы» (скачивание файлов промежуточных размеров, просмотр видеоклипов). Этот тип источников занимает промежуточное положение между «слонами» и «мышами» (по терминологии работы [12]). К этому классу относится загрузка файлов промежуточной длины 0,3–10 Мбайт. Одна из причин появления заметного количества потоков класса В состоит в том, что, как показали измерения [8, 9], очень большой процент загрузок (по разным оценкам – от 30 до 70 %) видеoinформации представляет собой кратковременные просмотры начала видеоклипа или фильма. В течение времени порядка 1 мин или менее пользователь просматривает клип и принимает решение о том, стоит ли продолжать просмотр (в большинстве случаев не продолжает).

3. Класс С. МДП  $< 0,3$  Мбайт – «мыши» (просмотр веб-страниц, электронная почта ICQ и др. При современных скоростях доступа 1–10 Мбит/с «время жизни мышей» меньше или порядка нескольких секунд. Доля потребляемого ими трафика мала – по данным работы [10] менее 10 % (при этом доля пользователей, принимающих данный вид трафика, до 80 % [11]).

Параметр, который важно определять при моделировании источников трафика класса А, – число потоков, активных в течение всего времени моделирования.

Класс В описывается моментами включения и выключения потоков. Кроме того, для каждого потока производится статистический розыгрыш времени оборота сигнала  $R$ , для чего тоже должна быть задана соответствующая функция распределения.

Априори понятно, что флуктуациями потока, создаваемого пользователями класса С, можно пренебречь, поскольку на рассматриваемых вре-

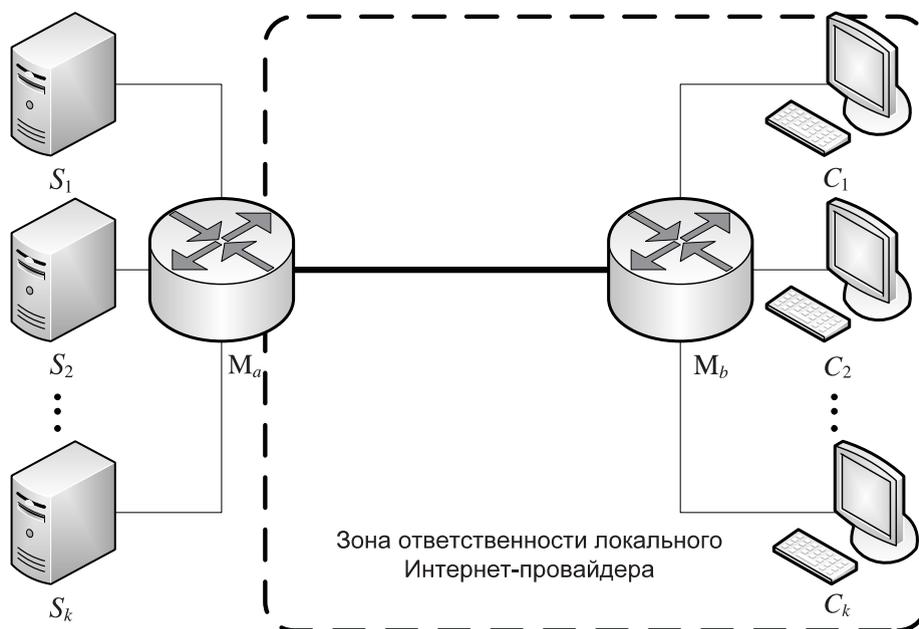


Рис. 1. Конфигурация моделируемой сети

$M_a$  – магистральный маршрутизатор;  $M_b$  – маршрутизатор локального интернет-провайдера;  
 $S_1...S_k$  – удаленные серверы;  $C_1...C_k$  – рабочие станции (клиенты)

менных интервалах флуктуации большого числа однородных случайных процессов усредняются. Следовательно, «мыши» не могут быть причиной интересующих нас выбросов интенсивности передаваемых в канале данных (> 10 %).

### Результаты расчетов

Рассмотрим типичные результаты, полученные при моделировании сети, включающей магистральную линию и каналы связи с клиентами (рис. 1).

Предположим, что каждый клиент получает данные от своего сервера, и обслуживание клиентов происходит в режиме с гарантированной скоростью доступа  $CAR$ . «Узким горлом» в рассматриваемой системе является канал связи

интернет-провайдера с магистральным маршрутизатором, обладающий пропускной способностью  $P$ .

Для определения самоподобных свойств трафика был использован показатель Херста [1], значение которого оценивалось в соответствии с методикой, описанной в [2] (напомним, что для белого шума  $H = 0,5$ , а для самоподобного процесса  $H$  находится в интервале  $0,5 \div 1$ ).

Проводились расчеты с использованием трех вариантов жидкостных моделей (результаты расчетов приведены в таблице):

модель 1 – активность 100 пользователей (10 «слонов» и 90 «мулов»);

модель 2 – активность 100 пользователей (90 «слонов» и 10 «мулов»);

### Результаты расчетов

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение
Модель 1											
$H$	0,85	0,86	0,77	0,73	0,76	0,84	0,79	0,84	0,74	0,77	0,80±0,04
Модель 2											
$H$	0,54	0,53	0,51	0,53	0,52	0,53	0,54	0,53	0,52	0,53	0,53±0,01
Модель 3											
$H$	0,70	0,65	0,65	0,67	0,73	0,72	0,62	0,74	0,62	0,76	0,69±0,05

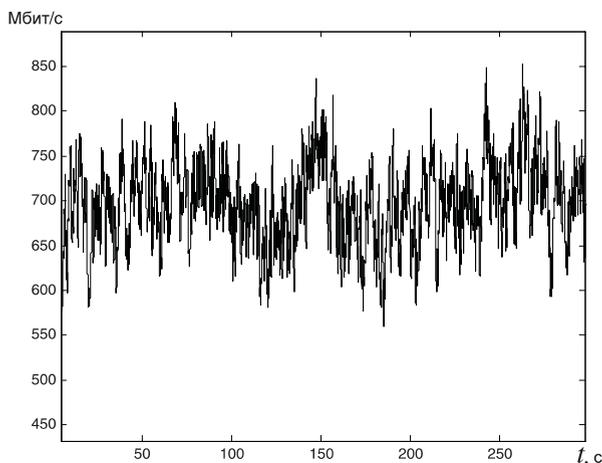


Рис. 2. Расчетная зависимость интенсивности поступления данных на вход маршрутизатора от времени (перезгрузки не возникают)

модель 3 – активность 100 пользователей как и в модели 1, при этом канал передачи перегружен т. к. его пропускная способность лимитирована на уровне 700 Мбит/с.

Рассмотрим каждую из моделей более подробно. Гарантированная скорость доступа для каждого из пользователей – 10 Мбит/с ( $BC = 100$  Кбайт;  $BE = 2 \cdot BC = 200$  Кбайт;  $R = 20 + 80 \cdot \text{rand}(1, N)$  мс).

**Модель 1 (недогруженный канал передачи).** Активность «мулов»: *ON*-период – равномерно распределенная случайная величина с параметрами  $t_{\min} = 1$  с, до  $t_{\max} = 60$  с, *OFF*-период – экспоненциально распределенная случайная величина со средним временем  $t_{\text{off s}} = 3$  с.

Пропускная способность общего канала намного больше максимальной необходимой скорости передачи, т. е. канал недогружен (рис. 2). Средняя интенсивность поступления данных на маршрутизатор в представленной реализации 704 Мбит/с, максимум – 853 Мбит/с. При этом следует отметить, что средняя скорость пользователей класса А (10 пользователей) порядка 9,8 Мбит/с, а потоков класса В (90 пользователей) – 6,6 Мбит/с.

Из таблицы видно, что значения  $H$  для разных реализация случайного процесса несколько отличаются и лежат в интервале  $0,73 \div 0,86$ . Данный результат согласуется с экспериментальными данными, полученными в [1] (для одного и того же канала значения  $H$  находились в интервале  $0,54 \div 0,86$ ).

**Модель 2 (недогруженный канал передачи).** Видно, что если подавляющее число потоков

работает непрерывно (как «слоны»), то трафик является не самоподобным, а случайным броуновским процессом. Происходит усреднение, выбросы сглаживаются. Подтверждается предположение о том, что существенной причиной всплесков трафика является рассогласованность действий пользователей. И определяющая роль в этом принадлежит «мулам» – потокам, которые активны в интервале времен от 1 до 60 с. Следовательно, именно потоки средней длительности передачи (класс В) определяют самоподобные свойства сетевого трафика.

**Модель 3 (перегруженный канал).** Значение пропускной способности канала выбрано близко к среднему значению суммарной интенсивности генерируемого трафика (90 «мулов», 10 «слонов») – 700 Мбит/с. Учитывая, что в канале происходят всплески трафика, достигающие 20 % от среднего значения, канал в данном варианте будет сильно перегружен. Результат моделирования показан на рис. 3.

Значения показателя  $H$  уменьшились по сравнению со случаем недогруженного маршрутизатора, однако незначительно.

Возникающие в процессе передачи перегрузки влекут за собой потерю пакетов и, как следствие, принудительное снижение скорости. Это, в свою очередь, снижает среднюю скорость передачи отдельных пользователей (по сравнению с вариантом недогруженного канала). При этом скорость пользователей класса В становится в среднем на 0,5 Мбит меньше, а скорость потоков класса А остается неизменной.

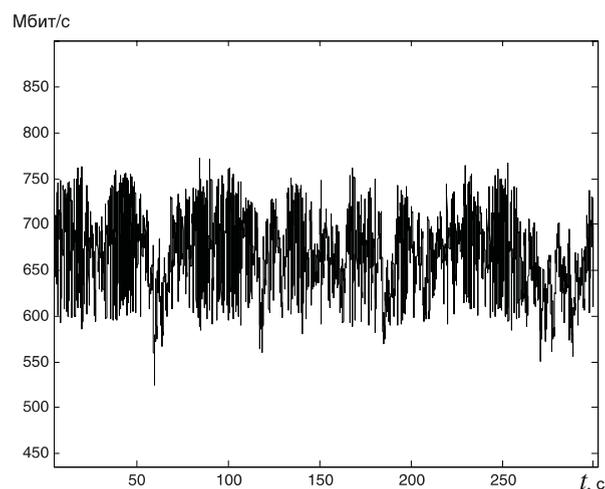


Рис. 3. Расчетная зависимость интенсивности поступления данных на вход маршрутизатора от времени (канал перегружен, объем буфера 1 Мб)

Таким образом, в режиме с высокой (> 5 Мбит/с) гарантированной скоростью доступа можно относительно комфортно работать даже при высокой загрузке магистрального канала. При перегрузках скорость доступа не будет снижаться критически, но пользователи будут получать меньше, чем обещано. Подразумевается, что при таком режиме эксплуатации каналов необходимо резервировать часть полосы пропускания для данных, передаваемых по протоколу UDP, т. к. UDP-пакеты необходимо защищать от сброса на передающем маршрутизаторе.

Использование жидкостных моделей трафика позволило рассмотреть самоподобные свой-

ства трафика в каналах с высокой пропускной способностью с учетом режимов обеспечения заданной скорости доступа клиентов и профилей пользователей. Проведенные расчеты показателя Херста позволяют лучше понять самоподобную природу Интернет-трафика и причины противоречивости данных, полученных различными исследователями.

Согласно полученным данным, основной причиной возникновения самоподобия является рассогласованность действий (запросов) пользователей, в результате которой могут возникать значительные всплески интенсивности передаваемых данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шелухин, О.И.** Моделирование информационных систем [Текст]/О.И. Шелухин, А.М. Тенякшев, А.В. Осин.–М.: Радиотехника, 2005.–368 с.
2. **Hernandez-Campos, F.** Generating realistic TCP workloads [Текст]/F. Hernandez-Campos, F.D. Smith, K. Jeray//In Proc. of Computer Measurement Group (CMG) Conf.–2004.–P. 273–284.
3. **Гребенкин, М.К.** Статистическая абт-модель Интернет-трафика в мультисервисных сетях [Текст]/М.К. Гребенкин, С.В. Поршнев//Тр. Междунар. науч.-практич. конф. «СВЯЗЬ-ПРОМ 2009».–Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2009.–Т. 2.–С. 55–58.
4. **Liu, Y.** Fluid Models and Solutions for Large-Scale IP Networks [Текст]/Y. Liu, F.L. Presti, V. Misra [et al.]//Performance Evaluation Review. –ACM SIGMETRICS, 2003.–Vol. 31.–Iss. 1.–P. 91–101,
5. **Шринивас, В.** Качество обслуживания в сетях IP [Текст]/В. Шринивас.–М.: Вильямс, 2003.–368 с.
6. **Lan, K.** A measurement study of correlations of Internet flow characteristics [Текст]/K. Lan, J. Heidemann//Computer Networks.–16 Jan. 2006.–Vol. 50.–Iss. 1.–P. 46–62.
7. **Ermann, J.** Byte Me: A Case for Byte Accuracy in Traffic Classification [Текст]/J. Ermann, A. Mahanti, M. Arlitt//Proc. of the III annual ACM workshop on Mining network data. –San Diego, California, USA, 12 June 2007. –P. 35–38.
8. **Yu, H.** Understanding User Behavior in Large-Scale Video-on-Demand Systems [Текст]/H. Yu, D. Zheng, B.Y. Zhao [et al.]//Proc. of the 1st ACM SIGOPS EuroSys European Conf. on Computer Systems. –ACM, NY, USA, 2006.–Vol. 40.–Iss. 4.–P. 333–344.
9. **Brampton, A.** Characterising and Exploring Workloads of Highly Intensive Video-on-Demand [Текст]/A. Brampton, A. MacQuire, M. Fry [et al.]//MULTIMEDIA SYSTEMS.–Computer Science, 2007.–Vol. 15.–P. 3–17.
10. **Pellicer-Lostao, C.** Modelling user's activity in a real-world complex network [Текст]/C. Pellicer-Lostao, D. Morato, R. Lopez-Ruiz//International Journal of Computer Mathematics. –Bristol, USA, Taylor & Francis, Inc, 2008.–Vol. 85.–Iss. 8.–P. 1287–1298.
11. **Zhang, Y.** On the Characteristics and Origins of Internet Flow Rates [Текст]/Y. Zhang, L. Breslau, V. Paxson [et al.]//On the Characteristics and Origins of Internet Flow Rates: Proc. of the 2002 conf. on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications.–ACM, NY, USA, 2002.–P. 309–322

УДК 004.896

*К.А. Аксенов, А.С. Антонова, И.А. Спицина*

## **АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ**

### **Задачи анализа и синтеза организационно-технических систем**

Анализ и синтез системы – это инструмент управления, направленный на более эффективную организацию системы с учетом ее ограничений и целей функционирования. В рамках поддержки принятых решений методы анализа и синтеза применяются для прогнозирования последствий принимаемых решений. В данном случае проводится анализ и построение возможных сценариев развития ситуаций, осуществляется синтез сценариев, оценка получаемых исходов и выработка политики, приводящей к наиболее желательным исходам. Компьютерная поддержка решения задач анализа и синтеза обеспечивает выработку наиболее перспективных и рациональных стратегий развития системы.

Формализованное решение задач анализа и синтеза представляет интерес с точки зрения автоматизации работы аналитиков и лиц, принимающих решения (ЛПР).

Рассмотрим следующие задачи анализа и синтеза организационно-технических систем (ОТС): создание виртуального предприятия, реинжиниринг бизнес-процессов (РБП), совершенствование бизнес-процессов (бенчмаркинг). Задача создания виртуального предприятия [1] относится к задачам структурного синтеза сложных систем. Цель создания виртуального предприятия – кооперация юридически независимых организаций и индивидуумов, производящих продукцию или услуги в общем бизнес-процессе. Цель РБП – реорганизация материальных, финансовых и информационных потоков, направленная на упрощение организационной структуры, перераспределение

и минимизацию использования ресурсов, сокращение сроков реализации потребностей клиентов и повышения качества их обслуживания.

РБП предполагает решение следующих задач: анализ существующего бизнес-процесса (БП) деятельности предприятия и его декомпозицию на подпроцессы; анализ узких мест в организации БП, связанных с перегрузкой ресурсов, образованием очередей или, наоборот, недогрузкой ресурсов; реорганизацию (синтез) БП с целью устранения узких мест и достижения заданных критериев эффективности.

Задача анализа узких мест в организации БП решается с помощью методов статического или динамического моделирования. Статическое моделирование (СМ) подразумевает описание и анализ структуры БП, а также проведение стоимостного анализа функций и выявление наиболее трудоемких и затратных функций, функций, не вносящих вклад в образование прибыли, и функций с низким коэффициентом использования ресурсов. Динамическое имитационное моделирование (ИМ) позволяет генерировать выполнение множества операций бизнес-процесса в течение длительного времени и проводить сбор статистики функционирования операций с выявлением узких мест их организации. В основе проведения РБП по данным СМ лежит эвристический подход, требующий высокой квалификации и опыта аналитика. Использование ИМ в РБП позволяет формализовать правила реинжиниринга и варианты их применения аналитиком.

Задача бенчмаркинга близка задаче РБП. Цель процессного бенчмаркинга – реорганизация БП на предприятии согласно эталонной модели БП. Эталонная модель основывается на комбинации

лучших бизнес-процессов различных организаций, которые выявляются в результате сравнительного анализа.

### **Анализ моделей динамического моделирования ситуаций**

Применение на практике подходов РБП как организационно-экономического инструмента управления имеет следующие ограничения: требования к высокой квалификации аналитика и его хорошей ориентации в предметной области, невозможность синтеза решений РБП и проверки выработанных решений на реальном объекте управления.

Автоматизация РБП с использованием методов ИМ и искусственного интеллекта позволит:

снизить требования к опыту аналитика по проведению анализа и синтеза систем за счет использования формализованного опыта экспертов и применения методов математического моделирования;

провести оценку выработанных решений реинжиниринга и выбор наиболее эффективного решения на модели объекта управления (модели ОТС).

Использование мультиагентного подхода на этапе формализации модели ОТС обусловлено наличием в исследуемой системе ЛПП, которые обладают мотивированным поведением, сотрудничают друг с другом, имеют накопленные знания о предметной области и сценариях решения задач управления. Модель интеллектуального агента (ИА) обеспечивает построение модели ЛПП, на основе которой осуществляется реализация информационной технологии анализа и синтеза моделей.

Рассмотрим задачу выбора модели формализации ОТС. В ходе исследования были выделены следующие модели динамического моделирования ситуаций, поддерживающие агентное представление ОТС: модель GAIA, модель Д.Ю. Бугайченко, модель А.В. Маслобоева, имитационная модель взаимодействия интеллектуальных агентов (ИМВИА), модель Ресурсы-Действия-Операции (РДО), модель мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР).

*Модель GAIA* [2] предложена М. Вулдриджем, Н. Дженнингсом и предназначена для описания системы как искусственной организации, состоящей из разнородных агентов, взаимодействующих друг с другом для достижения глобальной цели. Наиболее абстрактной сущностью в иерар-

хии концептов GAIA является система, следующий уровень иерархии это роли. Ролям ставятся в соответствие типы агентов системы. Функционал агента описывается при помощи модели служб, в которой каждая служба сопоставляется с деятельностью роли.

*Модель Д.Ю. Бугайченко* [3] описывает интеллектуальных агентов, имеющих ментальную (BDI) архитектуру. Свойства MAC автор модели описывает при помощи разработанной формальной логики MASL – метода логической спецификации мультиагентных систем с временными ограничениями, способных к накоплению и анализу опыта.

*Модель А.В. Маслобоева* [4] расширяет существующую InteRRap-архитектуру ИА за счет добавления в ее состав проблемно-ориентированной подсистемы непрерывного имитационного моделирования (комплекса системно-динамических моделей), которую агенты используют для имитации сценариев развития ситуаций и прогнозирования последствий своих действий.

*Имитационная модель взаимодействия интеллектуальных агентов* [5] разработана Г.В. Рыбиной и С.С. Паронджановым с целью формализации коммуникативной деятельности ИА с помощью моделирования отдельных компонентов коммуникации: состава участников взаимодействия, коммуникативной среды, проблемной области, языка взаимодействия, сценариев диалога. Взаимодействие ИА осуществляется путем диалога, включающего глобальную, тематическую и локальную структуры. Для описания взаимодействия авторами модели используется теория речевых актов (ТРА).

*Модель РДО* [6] предназначена для описания сложных дискретных систем и протекающих в них событий с целью изучения статических и динамических характеристик событий. Система в модели на концептуальном уровне представима в виде множества ресурсов, выполняющих определенные действия. Действия описываются операциями, представляющими собой модифицированные продукционные правила, учитывающие временные связи. Операция с нулевым временным интервалом называется «точкой решения» и является аналогом реактивного агента, хранящего в базе знаний ответные реакции на воздействие среды.

*Модель МППР* [7] разработана на основе расширения модели процесса преобразо-

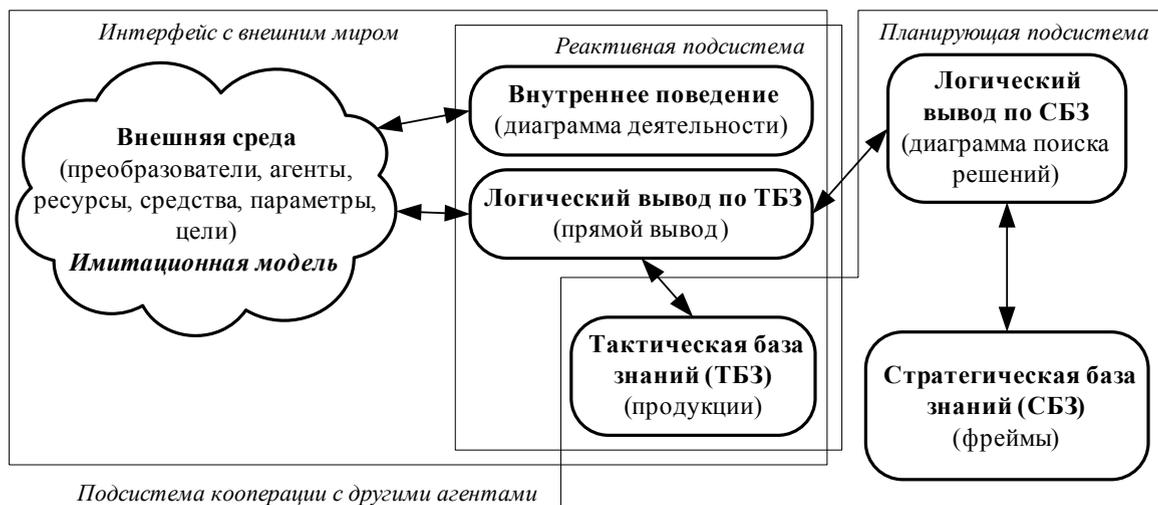


Рис. 1. Гибридная архитектура агента МППР

вания ресурсов (ППР) интеллектуальными агентами и предназначена для моделирования организационно-технических и бизнес-процессов и поддержки принятия управленческих решений. Агент модели МППР имеет гибридную архитектуру InteRRap, представленную на рис. 1.

Сравнительный анализ рассмотренных моделей динамического моделирования ситуаций приведен в табл. 1. Для проведения сравнительного анализа были выбраны следующие критерии сравнения систем: модель преобразователя ресурсов (модель дискретного бизнес-процесса); модель системы массового обслуживания (СМО) – инструмент, хорошо зарекомендовавший себя при анализе дискретных стохастических систем; модель реактивного агента и модель ИА (инструмент для описания моделей ЛПР).

Как следует из табл. 1, полный функционал ИА реализован в моделях Д.Ю. Бугайченко, А.В. Маслобоева и МППР. При этом агент у Д.Ю. Бугайченко не отождествляется с ЛПР, а представляет собой программную сущность, работающую независимо от эксперта (аналитика). А.В. Маслобоев использует в качестве средства прогнозирования действий агентов комплекс непрерывных системно-динамических моделей, не поддерживающих описание дискретных процессов, протекающих в исследуемых ОТС. Модель ИМВИА ориентирована прежде всего на исследование способов коммуникаций между агентами и не поддерживает интеграцию моделей агентов с системой ИМ. Модель GAIA объединяет в себе

модели преобразователя информационных ресурсов и ИА, однако по реализованному функционалу данная модель уступает РДО и МППР.

Модель РДО в области моделирования ППР схожа с моделью МППР и обеспечивает аналитика большим функционалом формализации процессов ОТС. Серьезным недостатком данной модели является отсутствие возможности реализации ИА. Модель МППР объединяет в себе модель гибридного агента (интеллектуального и реактивного) и модели преобразователя ресурсов и СМО. Модели преобразователя и СМО позволяют аналитику проводить анализ динамических характеристик ОТС. Модель гибридного агента позволяет разрешать задачи анализа в рамках прогноза различных сценариев поведения ЛПР.

Таким образом, наиболее полным функционалом формализации модели ОТС обладает модель МППР и реализующие модель продукты семейства BPsim ([www.bpsim.ru](http://www.bpsim.ru)).

#### Алгоритм анализа и синтеза

Анализ системы в рамках решения задач управления предприятием подразумевает построение аналитиком различных моделей (представлений) системы, отражающих требуемые аспекты ее поведения. Синтез построенных моделей направлен на получения альтернативных вариантов развития системы путем объединения в единый вариант различных подмножеств элементов модели. Будем различать *параметрический синтез*, при котором исходная модель преобразуется в ряд мо-

Таблица 1

Сравнительный анализ моделей динамического моделирования ситуаций

Критерии сравнения	Модель Бугайченко А	Модель Маслобоева	Модель Рыбиной	Модель GAIA	Модель РДО	Модель МППР
Модель преобразователя ресурсов						
вход/выход/условия запуска/длительность				+/+/+/НЕТ	+/+/+/+	+/+/+/+
иерархическая модель преобразователя	НЕТ	НЕТ	НЕТ	НЕТ	НЕТ	+
временное прерывание операций				НЕТ	НЕТ	+
Модель системы массового обслуживания	НЕТ	НЕТ	НЕТ	НЕТ	+	+
Модель реактивного агента (форма представления знаний)	Темпоральная логика MASL	Производство	Раскрашенные сети Петри	НЕТ	Производство	Производство
Модель интеллектуального агента						
наличие у агента целей	+	+	+	+		+
прогнозирование действий	+	+	НЕТ	НЕТ		+
анализ и планирование действий	+	+	+	+		+
модель самообучения агентов	+	+	+	НЕТ		+
технология реализации компонент планирования, прогнозирования, обучения	ЭС на основе разрешающих диаграмм	Системно-динамическое ИМ	ЭС	ЭС	НЕТ	Фреймвая ЭС
язык обмена сообщениями	ТРА / Сигналы	ТРА	ТРА	Сигналы		Сигналы
модель кооперации агентов	+	+	+	+		+
Программная реализация модели	Тестовая реализация	Прототип МАС	Прототип МАС ИМВИА	НЕТ	Тестовая реализация РДО-имитатор	Коммерческая реализация BPsim

делей путем изменения значений отдельных параметров модели, и *структурный синтез*, при котором новые модели образуются из исходной путем изменения структуры модели согласно правилам. *Смешанный синтез* подразумевает выполнение структурного и параметрического синтеза. Актуальной задачей является разработка алгоритма анализа и смешанного синтеза модели.

Рассмотрим исходную модель МППР  $M_0$ , предназначенную для анализа процессов, протекающих в системе. В результате проведения эксперимента формируется статистика выполнения операций, функционирования агентов и использования средств в операциях. Алгоритм проведения анализа и смешанного синтеза представлен на рис. 2 в виде графа поиска решений. Вершины графа имеют следующие обозначения: 0 – нулевое значение; М – малое значение; С – среднее значение; В – высокое значение соответствующего объекта графа (очереди, загруженности или простоя). Направленные переходы между вершинами графа соединяют выполненные условия анализа модели (вершины графа) в единое решение применения оператора синтеза. Например, решением для применения оператора «Удаление параллельной операции» является выполнение цепочки следующих условий: анализируемая статистика выполнения

модели содержит нулевые значения средней очереди заявок к операции, средней загруженности операции, нулевые значения простоя операции из-за отсутствия ресурсов и простоя операции из-за отсутствия средств. Пунктирные линии переходов графа соответствуют решениям для следующих выполненных условий: нулевой и малой очереди заявок к операции. Сплошные линии переходов графа соответствуют решениям для выполненного условия высокой очереди заявок к операции.

### Программная реализация интеллектуальных агентов анализа и синтеза в продуктах семейства BPsim

Реализация предложенного алгоритма анализа и синтеза модели осуществлялась с помощью технологии ИА продуктов семейства BPsim. Рассмотрим описание концептуальной модели предметной области агента:

$$M_{IA} = \langle Wizard, User, MPPR, ExpertModel, Exp, ExpOut, Analysis, Synthesis, SynthesisOut \rangle,$$

где *Wizard* – множество визардов (ИА), разработанных пользователями; *User* – множество пользователей; *MPPR* – множество элементов модели МППР; *ExpertModel* – множество элементов экс-

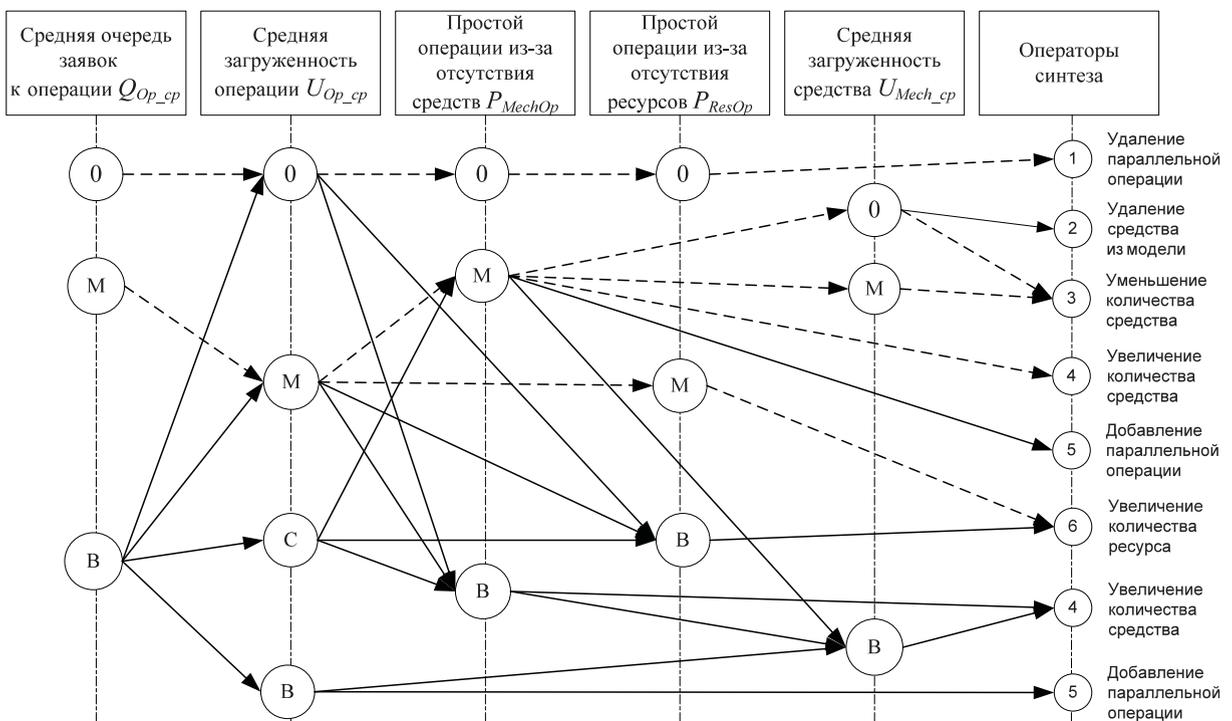


Рис. 2. Граф поиска решений применения операторов синтеза, реализуемый в интеллектуальном агенте

пертной модели; *Exp* – множество экспериментов с моделью МППР; *ExpOut* – множество элементов результата эксперимента; *Analysis* – множество правил анализа моделей; *Synthesis* – множество правил синтеза моделей; *SynthesisOut* – множество элементов результата синтеза.

Разработка структуры ИА анализа и синтеза осуществлялась в среде BPsim.MSS, поддерживающей построение DFD-диаграмм, диаграмм классов, диаграмм прецедентов и диаграмм последовательностей UML, а также настройку экранных форм пользовательского интерфейса.

### Применение интеллектуальных агентов анализа и синтеза ОТС

Продукты линейки BPsim использовались в ходе работе над проектом по анализу БП и разработке технического задания (ТЗ) на единую информационную систему (ЕИС) вуза УГТУ-УПИ. Вуз относится к предприятиям, имеющим сложную организационную структуру (факультеты, кафедры, филиалы и представительства), следовательно, успех автоматизации бизнес-процессов вуза зависит от качества их обследования и полного представления модели предприятия. Обследование БП выявило неоптимальность выполнения некоторых процессов УГТУ-УПИ, в частности, «Движение контингента». Кратко рассмотрим этот процесс [8].

В системе динамического моделирования ситуаций (СДМС) BPsim.MAS была построена ИМ процесса движения контингента «как было» (рис. 3). Данные для модели были получены в результате опроса сотрудников личного стола студентов (ЛСС), отдела автоматизированных систем управления (АСУ) и четырех деканатов. Узлы модели представляют собой этапы обработки документов. Узлы 1–10 моделируют обработку документа на факультетах, узлы 11–14 – обработку в ЛСС накопившихся за неделю документов, подготовленных факультетами. Использование ИА анализа и синтеза позволило установить ряд проблем. Рассмотрим их подробнее.

1. ИА анализа и синтеза выявил в ИМ наличие двух видов идентичных заявок. Аналитик установил, что сотрудники деканата формировали в разное время два схожих по содержанию документа – заявление и выписку в приказ. Рекомендация – привести их к единому виду.

2. ИА анализа и синтеза диагностировал нали-

чие петли обратных связей, что для БП документооборота является плохим показателем. Анализ большой загрузки проректора, сотрудников ЛСС и деканата показал, что в ЛСС и в деканате образовывались очереди документов с целью формирования комплекта, что удлиняло время обработки документов. Также проректор три раза просматривал и визировал различные документы о студенте схожего содержания (заявление, выписку в приказ, приказ). Рекомендация – автоматизация процесса, работа с электронными документами.

3. Аналитик установил участие в рассматриваемом БП сотрудников отдела АСУ, которые выполняют проводки приказа в базе данных. Рекомендация – автоматизация процесса, внесение изменений в базу данных только сотрудниками, ответственными за информацию и устранение несвойственной функции отдела АСУ.

В результате анализа и синтеза были предложены следующие изменения процесса «Движение контингента»:

1) во время написания заявления студентом сотрудник деканата создает его электронный аналог в единой БД (разделение ресурсов в модели);

2) предлагается отказаться от формирования выписки в приказ, вся необходимая информация для издания приказа заносится в единую БД, следовательно, сбор виз будет проводиться один раз (сокращение видов заявок, результат автоматизации БП);

3) сотрудники ЛСС будут работать с электронной формой заявления и смогут сами его корректировать, т. е. не будет теряться время на отправку документов в деканат для переформирования (разделение ресурсов в модели между участниками – с точки зрения имитационной модели это соответствует увеличению количества ресурса);

4) появится возможность формировать и хранить дела студентов в электронном виде (история по студенту) (новое качество БП, появившееся в результате автоматизации);

5) у проректора будет подписываться только заявление (для некоторых видов заявлений достаточно визы декана) и приказ по УГТУ-УПИ (сокращение видов документов (заявок), сокращение нагрузки за счет устранения лишних операций в БП, связанных с петлями обратной связи);

6) в информационной системе можно будет отслеживать маршрут и стадии прохождения документов по процессу (новое качество БП, появившееся в результате автоматизации);

### Движение контингента

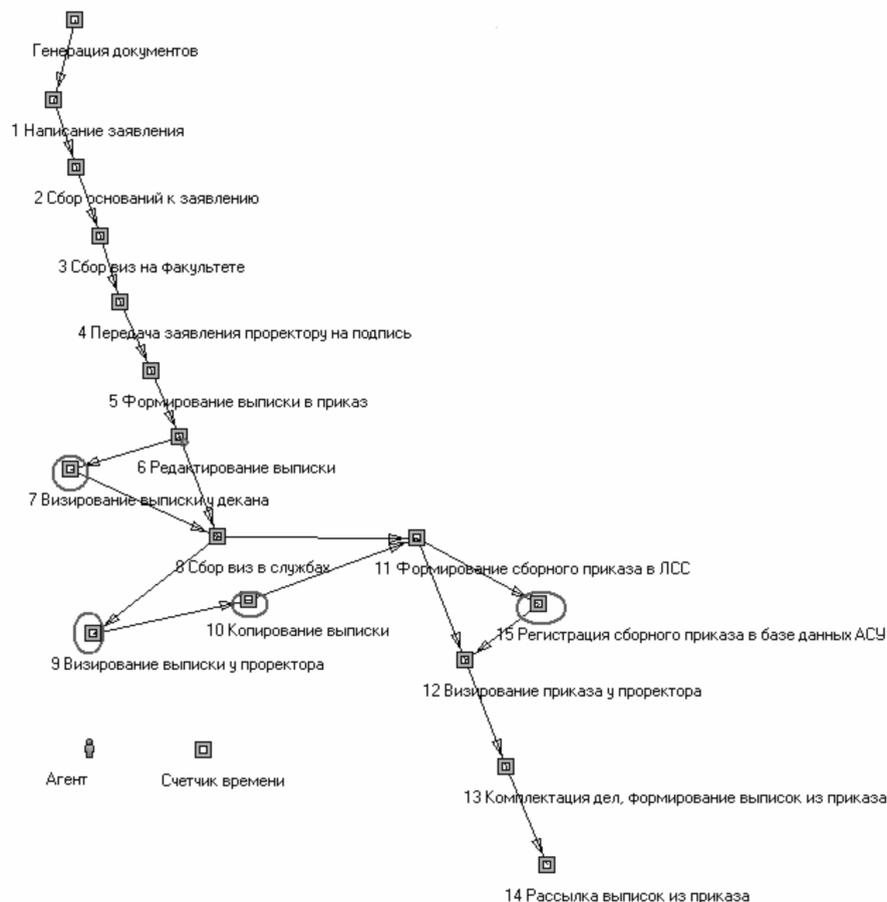


Рис. 3. Модель процесса «Движение контингента»

7) у сотрудников отдела АСУ исчезнет не свойственная им функция – выполнение проводок приказа в базе данных (перераспределение функций и ответственности в результате автоматизации);

8) в случае списочного приказа, соответствующие информационные объекты в информационной системе формирует сотрудник деканата, в дальнейшем с ними работает сотрудник ЛСС (сокращение видов заявок, результат автоматизации БП).

В результате, в модели «как будет» процесса «Движение контингента» исчезли узлы с номерами 7, 9, 10, 15 (рис. 3). Описание нового БП легло в основу ТЗ на разработку модуля «Движение контингента» ЕИС. Также в ТЗ использовались диаграммы из продукта BPsim.SD (CASE-средства). После разработки и полугодовой эксплуатации была проведена оценка эффективности внедрения

модуля «Движение контингента» ЕИС на основе имеющейся ИМ процесса движения контингента «как было» и «как будет».

Обобщенные результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Таким образом, благодаря автоматизации процесса «Движение контингента» производительность сотрудников деканата повысилась на 25 %, а производительность сотрудников ЛСС – на 229 % (более чем в три раза). Экономический эффект от внедрения моделей «как будет» и автоматизации процесса «Движение контингента» составляет 1 027 тыс. руб. в год.

В ходе работы были рассмотрены следующие модели СДМС: Д.Ю. Бугайченко, А.В. Маслобоева, ИМВИА, GAIA, РДО, МППР. Для проведения сравнительного анализа моделей были выбраны следующие представления систем: модель

Таблица 2

Оценка внедрения модуля «Движение контингента»

Показатели	Модель «как было»	Модель «как будет»
Количество обрабатываемых документов за месяц, шт.	390	1264
Количество потерянных документов за месяц, шт.	12	0
Производительность труда сотрудников деканата, документ/ч	0,4	0,5
Производительность труда сотрудников ЛСС, документ/ч	2,4	7,9

преобразователя ресурсов, модель СМО, модель реактивного агента, модель ИА. Анализ рассматриваемых моделей показал, что все выделенные представления систем поддерживает только модель МППР.

Разрабатываемые в рамках программных продуктов VPsim ИА анализа и синтеза МППР предназначены для автоматизации работы аналитика

по проведению анализа исходной модели, разработке правил структурных и параметрических изменений, проведению синтеза исходной модели и генерации новых моделей, удовлетворяющих заданным критериям эффективности протекающих в системе бизнес-процессов.

Работа выполнена в рамках государственного контракта 02.740.11.0512.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андрейчиков, А.В.** Интеллектуальные информационные системы [Текст]/А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова.–М.: Финансы и статистика, 2006.–424 с.
2. **Wooldridge, M.** The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design [Текст]/M. Wooldridge, N. Jennings, D. Kinny//Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 3.–2000.–Р. 285–312.
3. **Бугайченко, Д.Ю.** Абстрактная архитектура интеллектуального агента и методы ее реализации [Текст]/Д.Ю. Бугайченко, И.П. Соловьев//Системное программирование.–2005.–№1.–С. 36–67.
4. **Маслобоев, А.В.** Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом [Текст]/А.В. Маслобоев//Вестник МГТУ.–2009.–№1.–Т.12.–Вып.1.–Мурманск: МГТУ, 2009.–С. 113–124.
5. **Рыбина, Г.В.** Моделирование процессов взаи-

- модействия интеллектуальных агентов в многоагентных системах [Текст]/Г.В. Рыбина, С.С. Паронджанов// Искусственный интеллект и принятие решений. –2008. –№ 3. –С. 3–15.
6. **Емельянов, В.В.** Введение в интеллектуальное имитационное моделирование сложных дискретных систем и процессов. Язык РДО [Текст]/В.В. Емельянов, С.И. Ясиновский.–М.: АНВИК, 1998.–427 с.
7. **Аксенов, К.А.** Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов [Текст]/К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова.–Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006.–311 с.
8. Результаты обследования и формирования требований на создание единой ИС поддержки учебного процесса (с 15. 05. 2005 по 14. 02. 2006): Отчет по проекту № \*01200601073/ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ» [Текст]/ Руковод. работы А.К. Аксенов. –Екатеринбург. –2006.–119 с.

УДК 004.855.5

*П.В. Трифонов*

**ПРИМЕНЕНИЕ СПИСОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ  
В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ**

Организация больших библиотек текстовых документов (книг, статей, отчетов, архивов новостей и т. п.) требует их тематического упорядоче-

ния, причем для их эффективной работы необходимо наличие автоматизированных инструментов решения данной задачи. Ввиду отсутствия четких

критериев отнесения произвольного документа к той или иной категории до настоящего времени не удалось построить надежных алгоритмов решения этой задачи. Практически все известные методы автоматической классификации характеризуются достаточно большой вероятностью ошибки.

Широко распространенным методом борьбы со случайными ошибками в информационных системах является использование методов помехоустойчивого кодирования. В данной статье предлагается решение задачи автоматической классификации, в котором методы списочного декодирования, разработанные в теории корректирующих кодов, используются для повышения точности существующих алгоритмов классификации.

Статья организована следующим образом. В главе 1 описывается используемая модель представления документов. Предлагаемое решение задачи автоматической классификации изложено в главе 2. Численные результаты представлены в главе 3.

### 1. Представление данных для классификации

Предложения на естественных языках, как правило, могут быть описаны в виде некоторого марковского случайного процесса. Однако большой объем алфавита (т. е. словаря) и значительная глубина памяти этого процесса делают задачу нахождения его параметров практически неразрешимой. В связи с этим при решении задачи классификации обычно представляют текст в виде списка слов с указанием числа их вхождений. При этом устойчивые словосочетания могут рассматриваться как единые слова. Вместе с тем, многие общеупотребительные слова (союзы, предлоги и т. п.) несут крайне мало информации о тематической принадлежности документа. Поэтому они обычно исключаются из рассмотрения с целью упрощения последующей обработки. С другой стороны, различные грамматические формы слов, как правило, примерно равнозначны с точки зрения определения тематической принадлежности текста. Таким образом, целесообразно преобразование их на единой грамматической основе [2]. Результатом описанных преобразований является вектор  $g$  целых чисел (вектор признаков), указывающий количество вхождений в документ различных нетривиальных слов во всевозможных грамматических формах. Но даже

после применения описанных выше преобразований размерность этого вектора, т. е. число основ различных слов, встречающихся в обрабатываемых документах, остается чрезмерно большим. С целью повышения точности и скорости работы алгоритмов классификации целесообразно выделить те основы (ключевые слова), наличие или отсутствие которых в документах дает наибольшую информацию об их тематической принадлежности.

Пусть  $D$  – множество документов и дана функция  $F_i(d): D \rightarrow \{0,1\}$ , принимающая значение единицы тогда и только тогда, когда документ  $d \in D$  содержит слово с номером  $i$ . Пусть  $C_j(d): D \rightarrow \{0,1\}$  – функция, принимающая значение единицы тогда и только тогда, когда документ  $d \in D$  относится к категории  $j, j = 1..m$ . Значения этих функций являются случайными величинами, совместное распределение которых определяется свойствами рассматриваемого пространства документов  $D$ . Факт наличия или отсутствия слова  $i$  в документе может быть использован для принятия решения о его принадлежности к категории  $j$  только в том случае, если эти случайные величины являются зависимыми. Существуют различные подходы к отбору наиболее значимых компонентов вектора признаков, среди которых наибольшее распространение получили метод взаимной информации и критерий  $\chi^2$  [2]. Они сводятся к поиску  $i$ , соответствующих нескольким наибольшим значениям  $I(F_i(d); C_j(d))$  или  $\chi^2(F_i(d); C_j(d))$  соответственно. Здесь  $I(A; B) = -\sum_{a=0}^1 \sum_{b=0}^1 P\{A=a, B=b\} \log_2 \frac{P\{A=a, B=b\}}{P\{A=a\}P\{B=b\}}$  – взаимная информация случайных величин  $A$  и  $B$ , и  $\chi^2(A; B) = \sum_{a=0}^1 \sum_{b=0}^1 \frac{(N_{a,b} - E_{a,b})^2}{E_{a,b}}$ ;  $N_{a,b}$  – истинное количество в обучающем наборе документов с  $A=a, B=b$  и  $E_{a,b}$  – математическое ожидание их количества, вычисленное в предположении о независимости случайных величин  $A$  и  $B$ . Пусть  $\Phi_j$  – множество отобранных таким образом признаков для категории  $j$ . Новый вектор признаков  $f$  составляется из компонентов исходного вектора  $g$  с номерами  $i \in \bigcup_j \Phi_j$ .

Многочисленные эксперименты показывают, что для повышения точности классификации необходимо также ввести некоторую меру значимости для каждой компоненты сформированного описанным выше способом вектора признаков. Наибольшее распространение получила

схема взвешивания, известная как TF-IDF (term frequency-inverse document frequency) [2]. В соответствии с ней для каждого документа строится вектор взвешенных признаков с компонентами

$$h_i = f_i \log \frac{N}{N_i}, i = 1..n, \text{ где } N - \text{ общее число до-}$$

кументов в обучающем наборе;  $N_i$  – число документов в нем, содержащих  $i$ -е отобранное ключевое слово;  $f_i$  – число вхождений  $i$ -го ключевого слова в рассматриваемый документ.

В результате описанных преобразований задача классификации текстовых документов сводится к задаче классификации векторов неотрицательных вещественных чисел.

## 2. Классификация с помощью корректирующих кодов

Часто оказывается, что многие документы могут быть одновременно отнесены к нескольким категориям. В такой ситуации наиболее распространенным подходом к построению классификатора является построение  $m$  двоичных классификаторов, каждый из которых принимает решение о принадлежности или непринадлежности документа к соответствующей категории. Цель данной статьи – повышение точности автоматической многоклассовой категоризации.

Повышение точности категоризации может быть достигнуто путем построения нескольких элементарных двоичных классификаторов, совокупность решений которых используется для определения принадлежности документа к каждой из категорий. При этом каждой категории должна быть сопоставлена некоторая область в пространстве решений элементарных классификаторов, попадание в которую является достаточным условием для принятия решения о принадлежности документа к данной категории. Данный подход известен как помехоустойчивое выходное кодирование [1, 4]. Он предполагает построение таких решающих областей, как некоторых хемминговых сфер с центрами, являющимися кодовыми словами корректирующего кода с подходящими параметрами. Более конкретно, каждой из категорий сопоставляется кодовое слово некоторого двоичного кода длины  $n$ . На этапе обучения производится построение  $n$  двоичных классификаторов некоторого типа, производящих распознавание каждого из символов кодовых слов. При предъявлении нового документа на этапе классификации формируется вектор оценок  $c'_i$ , после

чего находится ближайшее к нему кодовое слово и соответствующая ей категория. Таким образом, допускается возможность принятия некоторой частью элементарных классификаторов ошибочных решений, причем доля исправимых ошибок определяется минимальным расстоянием используемого корректирующего кода. При этом, однако, не удастся обеспечить возможность отнесения документа одновременно к нескольким категориям. Кроме того, на этапе обучения из обучающей выборки приходится исключать документы, отнесенные к нескольким категориям. Данный подход не учитывает также расположение различных категорий в пространстве документов. В данной статье предлагается модификация метода помехоустойчивого выходного кодирования, позволяющая решить данную проблему.

Предлагаемый подход состоит в следующем. Сопоставим каждой категории некоторое кодовое слово  $c_j = (c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn})$ ,  $j = 1..m$ , двоичного корректирующего кода длины  $n$ , так что различным категориям соответствуют различные кодовые слова. Сопоставим  $i$ -му документу обучающего набора

вектор меток  $(y_{i1}, \dots, y_{in})$ , где  $y_{ik} = \left[ \frac{\sum_{s=1}^{w_i} c_{j_{is}k}}{w_i} + 0,5 \right]$ ,

$j_s$  – номер  $s$ -й категории, сопоставленной документу,  $s = 1..w_i$ . Видно, что эта схема сводится к голосованию по каждому символу кодовых слов, сопоставленных тем категориям, к которым относится данный документ. Введем также меру рассогласования  $\Delta = \sum_i \sum_{s=1}^{w_i} \sum_{k=1}^n |y_{ik} - c_{j_{is}k}|$ . Чем она меньше, тем точнее соответствует назначение кодовых слов реальному соотношению между различными категориями документов. Таким образом, возникает возможность оптимизации назначения кодовых слов категориям. Точное решение задачи минимизации функции  $\Delta$  с учетом условия принадлежности векторов  $c_j$  заданному коду требует значительных вычислительных затрат. В связи с этим возникает необходимость использования субоптимальных методов. Эксперименты показывают, что хорошие результаты могут быть получены путем построения нескольких случайных назначений и выбора из них того, которое соответствует наименьшему значению  $\Delta$ . После нахождения субоптимального назначения меток могут быть построены  $n$  двоичных

классификаторов  $v_k : v_k(h^{(i)}) \approx y_{ik}, k = 1 \dots n$ , где  $h^{(i)}$  – взвешенный вектор признаков  $i$ -го документа и оператор  $\approx$  имеет смысл «почти для всех  $i$ ». Найдем далее все кодовые слова, находящиеся в хемминговых сферах заданного радиуса  $r$  с центрами  $(v_1(h^{(i)}), \dots, v_n(h^{(i)}))$ . Выберем среди них те, которые попадают не менее чем в  $t$  таких сфер. Сопоставим каждому найденному таким образом кодовому слову список категорий, к которым относится  $i$ -й документ из обучающего набора. В результате модель, формируемая на этапе обучения, включает:

параметры элементарных классификаторов  $v_k(h) : R_+^n \rightarrow \{0,1\}, k = 1 \dots n$ ;  
 список кодовых слов  $\hat{c}_j$  и соответствующих им категорий.

На этапе классификации документа, представленного в виде взвешенного вектора признаков  $h$ , воспользуемся построенными элементарными классификаторами для нахождения вектора  $(y_1, \dots, y_n): y_k = v_k(h)$ . Далее найдем ближайшее к нему в метрике Хемминга кодовое слово  $\hat{c}_j$  и припишем классифицируемому документу категории, сопоставленные на этапе обучения этому кодовому слову.

Ключевой фактор, определяющий вычислительную эффективность вышеописанных процедур обучения и классификации, – наличие вычислительно простого алгоритма поиска кодовых слов используемого корректирующего кода, находящихся на заданном расстоянии  $r$  от вектора решений элементарных классификаторов. Для  $(n, K, d)$  кодов БЧХ существует алгоритм решения данной задачи со сложностью, являющейся полиномиальной функцией от параметров кода,

при  $\frac{r}{n} < \frac{n}{2} \left(1 - \sqrt{1 - 2\frac{d}{n}}\right)$  [5]. В работах [7, 8]

предложен быстрый алгоритм, позволяющий решить данную задачу с практически приемлемыми вычислительными затратами.

Основное отличие предлагаемого подхода от классического метода помехоустойчивого выходного кодирования состоит в том, что одной категории сопоставляется не одно, а несколько кодовых слов, причем их назначение производится с учетом реального взаиморасположения категорий в пространстве документов.

### 3. Численные результаты

Эффективность предложенного подхода была исследована на примере стандартной тестовой

### Сравнение классификаторов

Тип классификатора	Точность	Полнота
Метод опорных векторов без кодирования (гауссовское ядро)	0,86	0,88
Метод опорных векторов без кодирования (линейное ядро)	0,81	0,84
Метод опорных векторов (линейное ядро) с кодом БЧХ (1023, 16, 495)	0,92	0,63
Метод опорных векторов (линейное ядро) с кодом БЧХ (31, 11, 9)	0,92	0,63
Метод опорных векторов (линейное ядро) с кодом БЧХ (127, 29, 41)	0,96	0,56

коллекции Reuters-21578, широко используемой для сравнения качества различных классификаторов [2]. Она включает в себя как обучающий, так и контрольный наборы документов, причем многие документы отнесены одновременно к нескольким категориям. В качестве элементарных классификаторов были использованы машины опорных векторов с гауссовским и линейным ядрами [6]. Эффективность оценивалась в терминах точности  $P = \frac{N_{ip}}{N_{ip} + N_{fp}}$  и полноты  $R = \frac{N_{ip}}{N_{ip} + N_{fn}}$ , где  $N_{ip}$  – число документов из контрольного набора, правильно опознанных как принадлежащие соответствующей категории;  $N_{fp}$  – количество документов, ошибочно отнесенных к этой категории;  $N_{fn}$  – количество документов, ошибочно не отнесенных к ней. Полученные результаты были усреднены по всем категориям.

В таблице представлены результаты проведенных исследований. Видно, что применение предложенного подхода позволяет существенно повысить точность. Платой за это является некоторое снижение полноты классификации. Необходимо также отметить, что предлагаемый подход допускает использование элементарных классификаторов с линейным ядром, для которых обучение и классификация могут быть реализованы с использованием простых вычислительных алгоритмов.

В статье предложен новый метод решения задачи классификации текстовых документов с

обучением, основанный на использовании аппарата помехоустойчивого кодирования. Главное преимущество данного подхода, по сравнению с классическим методом помехоустойчивого вы-

ходного кодирования, – возможность отнесения одного документа к нескольким категориям.

Работа выполнена благодаря гранту Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-1195.2009.9.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dietterich, T.G.** Solving multiclass learning problems via error-correcting output codes [Текст]/T.G. Dietterich// Journal of Artificial Intelligence Research.–1995.

2. **Manning, C.D.** Introduction to Information Retrieval [Текст]/C.D. Manning, P. Raghavan, H. Schuetze.–Cambridge University Press, 2008.

3. **Masulli, F.** Effectiveness of error correcting output coding methods in ensemble and monolithic learning machines [Текст]/F. Masulli, G. Valentini//Pattern Analysis and Applications.–2003.–Vol. 6. № 4.–P. 285–300.

4. **Lorena, A.C.** A review on the combination of binary classifiers in multiclass problems [Текст]/A.C. Lorena, A.C.P.L.F. de Carvalho, J.M.P. Gama//Artificial Intelligence Review.–2008.–Vol. 30.–P 19–37.

5. **Wu, Y.** New List Decoding Algorithms for

Reed–Solomon and BCH Codes [Текст] /Y. Wu // IEEE Transactions On Information Theory.–2008. –Vol. 54.–№ 8.–P. 3611–3630.

6. **Wang, L.** Support Vector Machines: Theory and Applications [Текст] /L. Wang.–Springer, 2005.

7. **Trifonov, P.** Efficient Interpolation in the Guruswami-Sudan Algorithm [Текст]/P. Trifonov//IEEE Transactions on Information Theory.–2010.–Vol. 56. –№ 9.–P. 4341–4349.

8. **Trifonov, P.V.** Another Derivation of Wu List Decoding Algorithm and Interpolation in Rational Curve Fitting [Текст]/P.V. Trifonov//Proc. of IEEE R8 International Conf. on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering.–2010. –P. 59–64.

УДК 681.3

*С.Ф. Тюрин, А.В. Греков, О.А. Громов*

### ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПОЛНЫЙ ТОЛЕРАНТНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Для повышения надежности цифровой аппаратуры часто используется троирование [1]. Это более чем трехкратная избыточность: необходимо три канала оборудования, мажоритарный элемент и три источника питания. При этом применяется мажоритарная функция:

$$z_1 = k_1 k_2 \vee k_1 k_3 \vee k_2 k_3, \\ k_1 = k_2 = k_3 = k,$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – однобитовые результаты вычислений соответствующих трех каналов вычислений.

Эта функция обладает свойством толерантности к однократным отказам (сбоям) в одном из трех каналов:  $k_i \rightarrow (k_i), k_i \rightarrow 1, k_i \rightarrow 0$ .

По существу, обеспечивается сохранение констант (0, 1).

Например, толерантность к константе «1» в канале № 1 обеспечивается следующим образом:

$$z_1 = 1k_2 \vee k_3 \vee k_2 k_3 = k \vee k \vee k k = k, \\ k_1 = k_2 = k_3 = k.$$

Толерантность к «0» в канале № 1:  $z_1 = 0k \vee 0k \vee k k = 0 \vee 0 \vee k k = k$ .

Кроме того, обеспечивается толерантность к инверсии в канале № 1 – к сбою:

$$z_1 = \bar{k} k \vee \bar{k} k \vee k k = 0 \vee 0 \vee k k = k.$$

В случае, если «к» является функцией, например, выходом одновыходного комбинационного автомата, то сохранение этой функции обеспечивается только за счет троирования (мажоритирования).

Менее затратным вариантом может быть обеспечение сохранения не самой функции, а лишь способности к ее восстановлению, например, за счет дополнительного времени, из оставшихся после отказа функций.

В [2–6] разработана концепция функционально-полного толерантного элемента (ФПТ элемента), сохраняющего не саму исходную функцию, а только лишь функциональную полноту при заданной модели отказов, например,

для классической модели однократных константных отказов. Это позволяет осуществлять частичное восстановление логики программируемой логической интегральной микросхемы (ПЛИС) после отказов за счет внутренних дополнительных программно-аппаратных средств микросхемы, либо за счет внешнего оборудования, обеспечивающего диагностирование и реконфигурацию ПЛИС.

Такой подход к элементной базе соответствует тенденциям своего рода ресурсосбережения в области отказоустойчивости – использованию даже ограниченных функциональных возможностей аппаратуры с отказами с целью адаптации к ним.

**Постановка задачи**

Функционально-полный толерантный элемент для модели константных однократных отказов входов [2–6] реализует функцию  $x_1 x_2 \vee x_3 x_4$  или, что то же самое, функцию  $(x_1 \vee x_2)(x_3 \vee x_4)$ .

Все модификации  $f_{4383} = x_1 x_2 \vee x_3 x_4$  для однократных константных отказов входов

$\overline{x_2 \vee x_3 x_4}, \overline{x_1 \vee x_3 x_4}, \overline{x_1 x_2 \vee x_4}, \overline{x_1 x_2 \vee x_3}$  представляют собой функции трех аргументов  $f_{31}, f_{87}$  обладающие функциональной полнотой, и функцию  $f_1$  двух аргументов – известный базис Вебба (стрелка Пирса  $\downarrow$ )  $x_3 x_4, x_1 x_2$  [6].

Реализация ФПТ элемента в виде транзисторной структуры на базе КМОП транзисторов с  $p$  и  $n$  каналами [7] приведена на рис. 1.

Здесь две параллельные цепочки транзисторов с  $n$  проводимостью реализуют путем дизъюнкции двух конъюнкций  $x_1 x_2 \vee x_3 x_4$  подключение источника питания на выход  $z$  при равенстве «1»  $x_1 x_2 \vee x_3 x_4$ .

В случае равенства дизъюнкции этих конъюнкций логическому «0», нижняя последовательно-параллельная цепь транзисторов с  $p$  проводимостью обеспечивает подключение шины «0 вольт» на выход  $z$  в соответствии с выражением  $(x_1 \vee x_2)(x_3 \vee x_4)$ .

Второй вариант ФПТ элемента, реализующий функцию  $(x_1 \vee x_2)(x_3 \vee x_4)$ , имеет вид, приведенный на рис. 2.

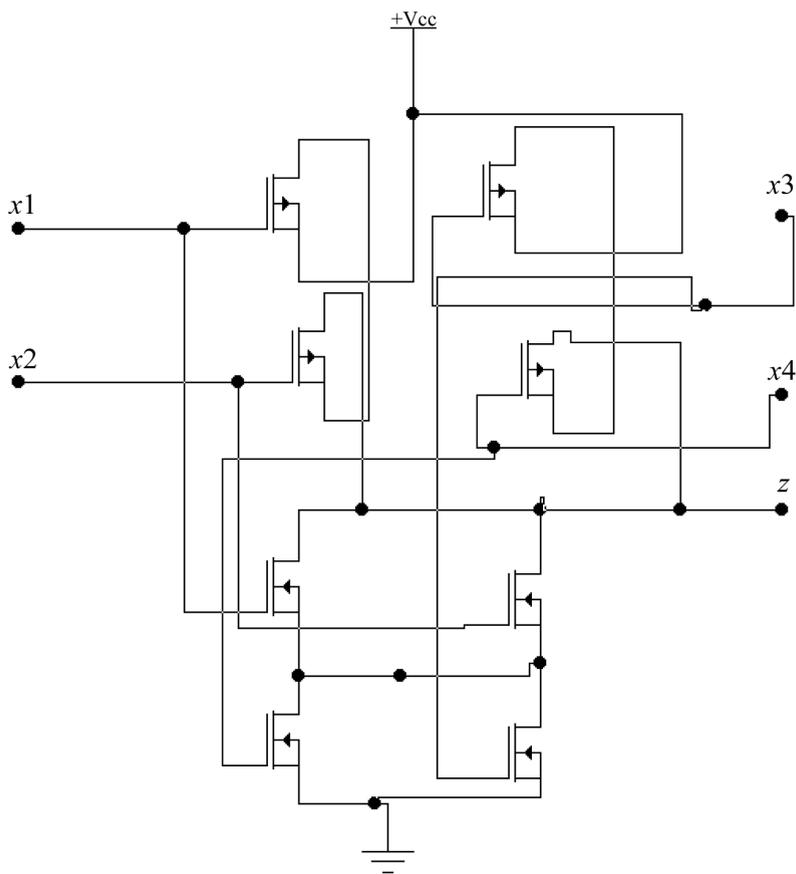


Рис. 1. ФПТ элемент в виде транзисторной структуры на базе КМОП-транзисторов с  $p$  и  $n$  каналами

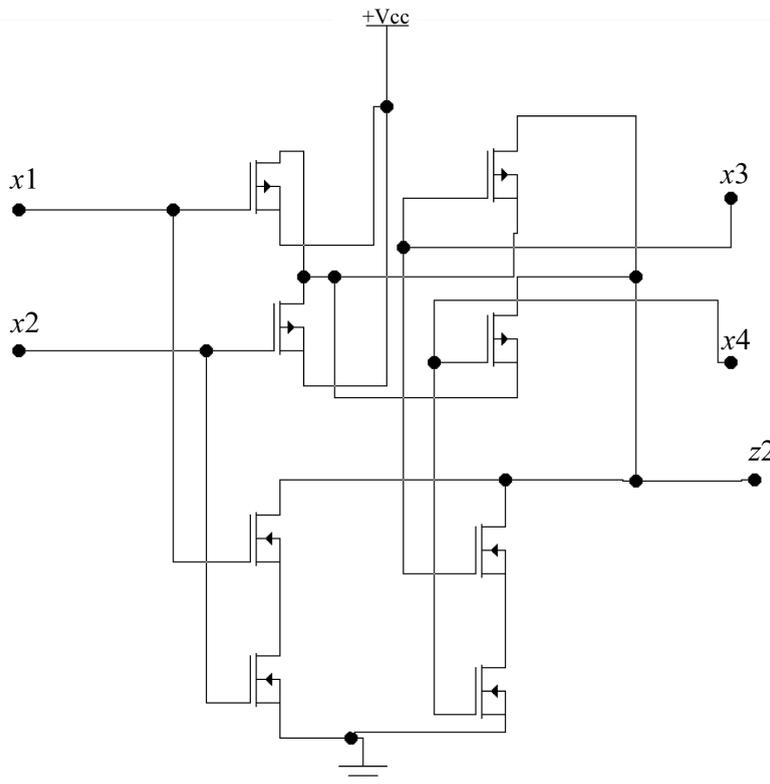


Рис. 2. Второй вариант ФПТ элемента

Здесь в верхней части схемы имеется последовательное соединение двух параллельных цепочек транзисторов с  $n$  проводимостью, реализующее конъюнкцию дизъюнкций  $x_1 \vee x_2$  и  $x_3 \vee x_4$ , что обеспечивает подключение источника питания на выход  $z$  при равенстве «1»  $(x_1 \vee x_2)(x_3 \vee x_4)$ .

В случае неравенства логической «1» этой конъюнкции нижняя последовательно-параллельная цепь транзисторов с  $p$  проводимостью обеспечивает подключение шины «0 вольт» на выход  $z$  в соответствии с выражением  $x_1 x_2 \vee x_3 x_4$ .

Однако при отказах функции этих элементов изменяются, хотя и сохраняется функциональная полнота. Это усложняет процесс восстановления — необходимо установить, какие функции сохранились, после чего произвести реконфигурацию в соответствии с максимально возможным общим базисом. Если это невозможно, необходимо выбрать максимальное подмножество элементов, обладающих общим базисом. При этом используются различные варианты файлов конфигурации. Рассмотрим возможность создания базисного элемента, который при заданной модели отказов сохраняет логическую функцию неизменной.

### Разработка элемента ФПТ+

Таблица функций внешних отказов (однократных константных отказов по входам) ФПТ элемента  $x_1 x_2 \vee x_3 x_4$  содержит строки 0000 и 1111, которые не изменяются при любом отказе (см. табл.).

То есть, можно получить инвертор  $\overline{x_1 x_1} \vee \overline{x_1 x_1}$  с четырехкратной избыточностью, толерантный к однократным константным отказам входов. Аналогично, при анализе внутренних отказов ФПТ элемента, построенного на КМОП-транзисторах [7], получаем инвертор  $x_1 x_1 \vee x_1 x_1$  с четырехкратной избыточностью, толерантный к однократным константным отказам транзисторов.

Таким образом, для сохранения простейшей логической функции при подобных отказах необходима четырехкратная избыточность.

Поставим задачу разработки базисного элемента, сохраняющего соответствующую логическую функцию при заданной модели отказов. Будем называть такой элемент ФПТ+. В качестве базисной возьмем функцию ИЛИ-НЕ  $x_1 x_2 = x_1 \vee x_2$ .

Тогда для сохранения базисной функции

Функции внешних отказов ФПТ элемента

№	X4	X3	X2	X1	Z	x <sub>1</sub> <sup>0</sup>	x <sub>2</sub> <sup>0</sup>	x <sub>3</sub> <sup>0</sup>	x <sub>4</sub> <sup>0</sup>	x <sub>1</sub> <sup>1</sup>	x <sub>2</sub> <sup>1</sup>	x <sub>3</sub> <sup>1</sup>	x <sub>4</sub> <sup>1</sup>
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
2	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
4	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1
5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
6	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1
9	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
10	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
11	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
12	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1
13	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
14	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
15	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ИЛИ-НЕ  $\overline{x_1 x_2}$  при модели однократных константных отказов необходимо выражение:

$$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_5 x_6 x_7 x_8}.$$

Легко заметить, что в случае

$$\overline{x_{1,1} x_{2,1} x_{1,2} x_{2,2}} \vee \overline{x_{1,3} x_{2,3} x_{1,4} x_{2,4}}$$

функция ИЛИ-НЕ  $\overline{x_1 x_2}$  сохранится при любом однократном константном отказе.

Например, при  $x_{1,1} = 1$  «обнудится» левая конъюнкция и остается  $\overline{x_{1,3} x_{2,3} x_{1,4} x_{2,4}}$  что, очевидно, соответствует  $\overline{x_1 x_2}$ , поскольку переменные  $x_{1,3} = x_{1,4} = x_1; x_{2,3} = x_{2,4} = x_2$ .

При  $x_{1,1} = 0$

$$\overline{x_{2,1} x_{1,2} x_{2,2}} \vee \overline{x_{1,3} x_{2,3} x_{1,4} x_{2,4}},$$

что, очевидно, соответствует  $\overline{x_1 x_2}$ , поскольку переменные  $x_{1,2} = x_{1,3} = x_{1,4} = x_1; x_{2,1} = x_{2,2} = x_{2,3} = x_{2,4} = x_2$ .

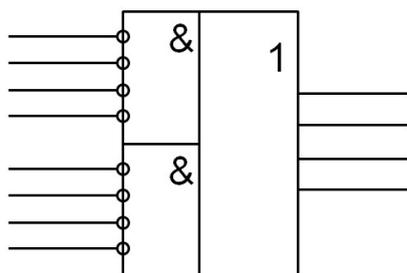


Рис. 3. Условное графическое обозначение элемента с толерантной базисной функцией

Толерантность сохраняется и при инверсии  $\overline{\overline{x}}$  переменной, например,  $x_{1,1}$ :  $\overline{x_{1,1} x_{2,1} x_{1,2} x_{2,2}} \vee \overline{x_{1,3} x_{2,3} x_{1,4} x_{2,4}}$ , при этом аналогично  $x_{1,1} = 1$  «обнулится» левая конъюнкция.

Следовательно, обеспечивается парирование сбоев. Толерантность обеспечивается и при замыкании соседних линий связи, а также при некоторых кратных отказах.

Причем, каждый вход «четверируется». Но и выходов надо также четыре (рис. 3).

Для реализации такой схемы на КМОП-транзисторах необходимо 16 транзисторов.

Такой подход близок к методу «учетверенной» логики (логики с переплетением) [8].

### Экспериментальная часть

Рассмотрим формирование функций подключения шин +, 0 вольт для ФПТ+ элемента, построенного на КМОП-транзисторах [9] (рис. 4):

$$z_+ = \overline{x_{1,1} x_{2,1} x_{1,2} x_{2,2}} \vee \overline{x_{1,3} x_{2,3} x_{1,4} x_{2,4}},$$

$$z_- = (x_{1,5} \vee x_{2,5} \vee x_{1,6} \vee x_{2,6})(x_{1,7} \vee x_{2,7} \vee x_{1,8} \vee x_{2,8}).$$

При отказе одного транзистора, соответствующего одной из переменных, ортогональность подключения шин питания не нарушается:

$$z_+ \oplus z_- = (\overline{x_{1,1} x_{2,1} x_{1,2} x_{2,2}} \vee \overline{x_{1,3} x_{2,3} x_{1,4} x_{2,4}}) \oplus$$

$$\oplus (x_{1,5} \vee x_{2,5} \vee x_{1,6} \vee x_{2,6})(x_{1,7} \vee x_{2,7} \vee x_{1,8} \vee x_{2,8}) = 1.$$

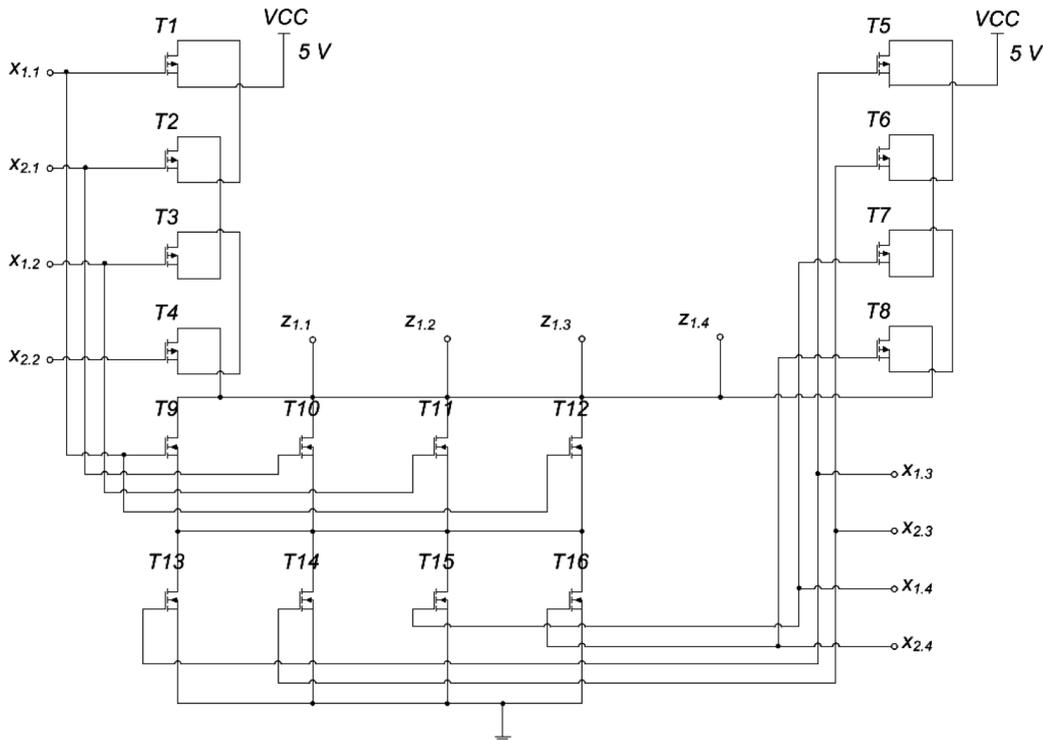


Рис. 4. Реализация базисного элемента ФПТ+ на КМОП-транзисторах

При любом однократном отказе в верхней части схемы будет  $z_+ = x_1 x_2$  и при любом однократном отказе в нижней части схемы  $z_- = x_1 \vee x_2$ .

Сравним сложность предлагаемого элемента с трюированием по выходам элемента ИЛИ-НЕ  $x_2 x_2$ .

Сам элемент – четыре транзистора, получаем 12 для трех каналов.

Мажоритирование:

$$K_1 K_2 \vee K_2 K_3 \vee K_1 K_3$$

Для представления в базисе ИЛИ-НЕ выполним двойную инверсию:

$$\overline{\overline{K_1 K_2 \vee K_2 K_3 \vee K_1 K_3}}$$

$$\overline{\overline{K_1 K_2 \vee K_2 K_3 \vee K_1 K_3}}$$

$$\overline{\overline{K_1 \vee K_2 \vee K_2 \vee K_3} \vee \overline{\overline{K_1 \vee K_3}}}$$

То есть необходимо семь элементов ИЛИ-НЕ (а это 28 транзисторов) + инверсии, если их нет, это еще три элемента или 12 транзисторов. Всего  $40+12 = 52$  транзистора, против 16 в предлагаемом элементе.

Оценим вероятность безотказной работы предлагаемого элемента. Зададим  $\lambda_{откр}$  – интенсивность отказов транзисторов,  $\lambda_{сбтр}$  – интенсив-

ность сбоев транзисторов,  $\lambda_{вв}$  – интенсивность отказов входов-выходов. Тогда при экспоненциальной модели отказов получаем для обычного базисного элемента

$$P_1 = e^{-(4\lambda_{откр} + 4\lambda_{сбтр} + 3\lambda_{вв})t}$$

для предлагаемого

$$P_2 = e^{-(16\lambda_{откр} + 16\lambda_{сбтр} + 12\lambda_{вв})t}$$

Пусть  $p$  – обобщенная вероятность отказа одного транзистора, тогда

$$P_1 = p^4,$$

$$P_2 = p^{16} + 16p^{15}(1-p).$$

С учетом возможности одного отказа либо в  $z_+$  либо в  $z_-$ , а также восьми случаев однократных отказов в  $z_+$  и одновременно восьми случаев однократных отказов в  $z_-$  – еще 64 случая двухкратных отказов:

$$P_2 = p^{16} + 16p^{15}(1-p) + 64p^{14}(1-p)^2.$$

Кроме того, парируются и другие двухкратные отказы. Так, в каждой конъюнкции (дизъюнкции) это  $C_4^2 = 6$  двухкратных отказов, но берем лишь отказы «константа 1» в конъюнкциях  $z_+$ , «обнуляющие» одну из них, и отказы «константа 1» в дизъюнкциях  $z_-$ , обращающие одну из них в единицу. То есть вместо шести всего половину – три случая. Получается еще 12 вариантов:

$$P_2 = p^{16} + 16p^{15}(1-p) + 76p^{14}(1-p)^2.$$

**Анализ полученных результатов**

Оценим вероятность безотказной работы без учета  $\lambda_{\text{вв}}$  – интенсивность отказов входных выходов.

Сравним  $p_1 = e^{-(4\lambda_{\text{откр}} + 4\lambda_{\text{сбтр}} + 3\lambda_{\text{вв}})t}$  и

$$p_2 = e^{-(16\lambda_{\text{откр}} + 16\lambda_{\text{сбтр}})t} + 16e^{-(15\lambda_{\text{откр}} + 15\lambda_{\text{сбтр}})t} \times (1 - e^{-(\lambda_{\text{откр}} + \lambda_{\text{сбтр}})t}) + 76e^{-(14\lambda_{\text{откр}} + 14\lambda_{\text{сбтр}})t} \times (1 - e^{-(\lambda_{\text{откр}} + \lambda_{\text{сбтр}})t})^2.$$

Таким образом, в области достаточно больших значений времени работы за счет введенной избыточности имеется значительный выигрыш в вероятности безотказной работы ФПТ+ элемента по сравнению с элементом ИЛИ-НЕ.

Разработанный элемент может быть использован как сложный (восьми переменных)

$$f = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_5 x_6 x_7 x_8}$$

в условиях отсутствия отказов, и отказоустойчивый (двух переменных) – в специальной ответственной аппаратуре.

Например, может быть реализован частично резервированный ФПТ базис

$$\overline{x_1 x_2} \vee \overline{x_3 x_4}$$

в виде  $f = \overline{x_1 x_2 x_1 x_2} \vee \overline{x_3 x_4 x_3 x_4}$ .

Тогда, например, реализация логической функции «Сумма по модулю два» трех переменных

$$m3 = \overline{x_3 x_2 x_1} \vee \overline{x_3 x_2 x_1} \vee \overline{x_3 x_2 x_1} \vee \overline{x_3 x_2 x_1} = \overline{x_3(x_2 x_1 \vee x_2 x_1)} \vee \overline{x_3(x_2 x_1 \vee x_2 x_1)},$$

представляемая в этом базисе как

$$m3 = \overline{x_3(x_2 x_1 \vee x_2 x_1)} \vee \overline{x_3(x_2 x_1 \vee x_2 x_1)}$$

потребуется всего три элемента с базисом  $\overline{x_1 x_2} \vee \overline{x_3 x_4}$

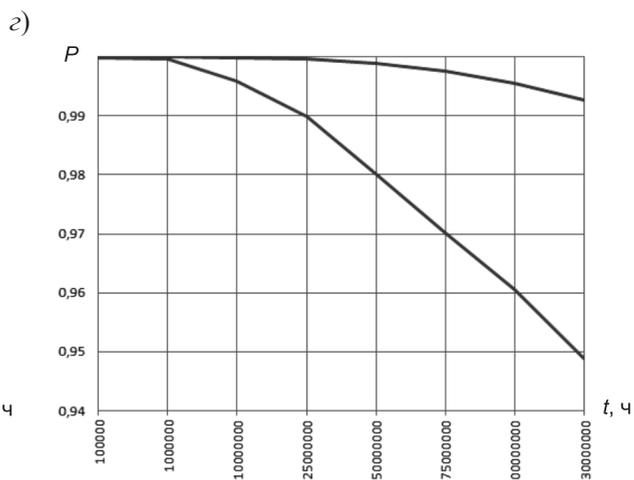
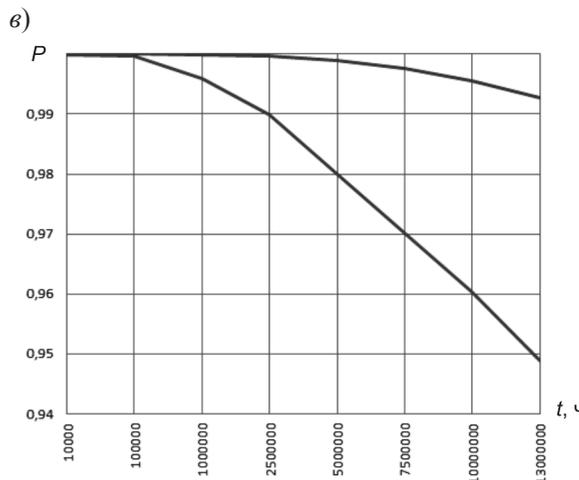
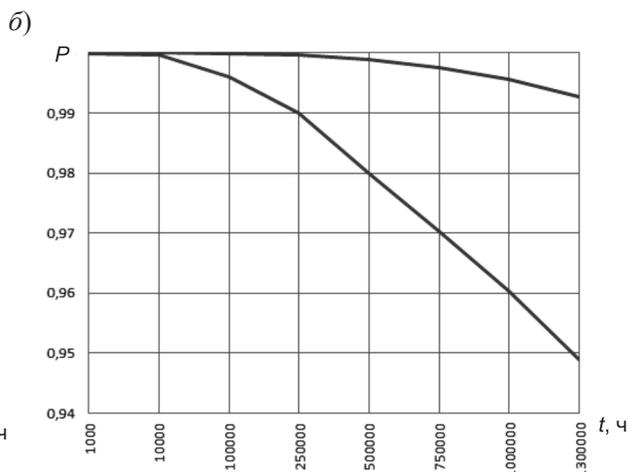
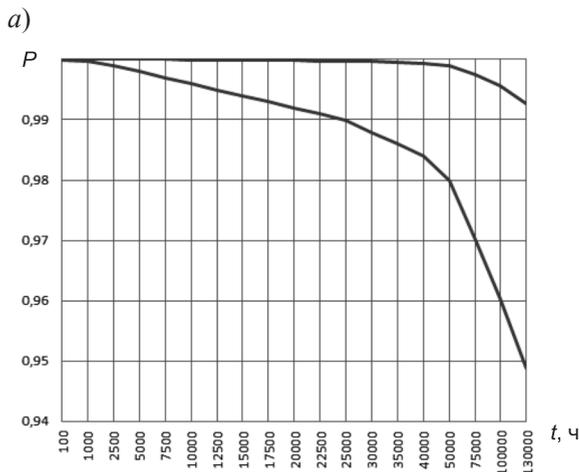


Рис. 5. Сравнительный анализ вероятности безотказной работы элемента ИЛИ-НЕ ( $P_1$ ) и ФПТ+ элемента ( $P_2$ ):  
 а –  $\lambda_{\text{откр}} = 10^{-9}, \lambda_{\text{сбтр}} = 10^{-7}$ ; б –  $\lambda_{\text{откр}} = 10^{-10}, \lambda_{\text{сбтр}} = 10^{-8}$ ; в –  $\lambda_{\text{откр}} = 10^{-11}, \lambda_{\text{сбтр}} = 10^{-9}$ ; г –  $\lambda_{\text{откр}} = 10^{-12}, \lambda_{\text{сбтр}} = 10^{-10}$   
 (—)  $P_1$ ; (---)  $P_2$

(при наличии парафазных входов). Легко заметить, что соответствующая реализация, например, в базисе  $x_1x_2x_3x_4$  потребует пять элементов, а в базисе  $x_1x_2$  – семнадцать элементов.

Предлагаемый элемент ФПТ+ может быть использован для создания цифровых схем высокой надежности, толерантных как к отказам, так и к сбоям, например, в медицинском оборудовании, в военной аппаратуре, в аппаратуре космических аппаратов, АЭС и др. Для этого целесообразно резервирование источника электропитания. Предлагаемые решения не являются «панацеей» и «чудо-оружием», но могут быть применены дополнительно к имеющимся средствам обеспечения надежности для повышения их эффективности. Например, возможно создание отказоустойчивой схемы контроля, тогда суммарная избыточность будет не слишком велика.

Кроме того, заявляемые подходы могут способствовать повышению процента «выхода годных» (yield rate) при производстве интегральных микросхем. Один из основных факторов, влияющих на процент выхода годных микросхем – качество кремниевой пластины. Считается, что у некоторых компаний он до сих пор не превышает 20–50 %, в то время как эффективным может считаться выход более 70 % годных чипов. При производстве кремниевой пластины возможны отказы типа коротких замыканий (bridges), западаний на 0 или 1 (stuck at 0, stuck at 1), обрывов дорожек; а также отказы

транзисторов: постоянно открыт – stuck short (on), постоянно закрыт – stuck open (off).

В случае обнаружения таких отказов (по некоторым оценкам их более 60 %) в логических элементах, пластина может быть признана бракованной. Логика на базе предложенных элементов в большинстве случаев сохраняет функциональную полноту, что позволит использовать даже кремниевые пластины с рассмотренными видами отказов, а это повышает процент «выхода годных» и экономит значительные средства даже с учетом затрат на усложнение схем. Если же отказов нет, возможно использование более сложного базиса, что приводит к более простым решениям.

Для сохранения базисной функции 2ИЛИ-НЕ  $x_1 \vee x_2$  при модели однократных константных отказов может быть предложено выражение:

$$(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4)(\bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_7 \vee \bar{x}_8),$$

то есть

$$(\bar{x}_{1.1} \vee \bar{x}_{2.1} \vee \bar{x}_{1.2} \vee \bar{x}_{2.2})(\bar{x}_{1.3} \vee \bar{x}_{2.3} \vee \bar{x}_{1.4} \vee \bar{x}_{2.4}).$$

Дальнейшим развитием подхода может быть сохранение более сложного и более эффективно ФПТ базиса [6, 7]  $x_1x_2 \vee x_3x_4$  – для этого необходима функция

$$(\bar{x}_{1.1}\bar{x}_{2.1}\bar{x}_{1.2}\bar{x}_{2.2} \vee \bar{x}_{1.3}\bar{x}_{2.3}\bar{x}_{1.4}\bar{x}_{2.4}) \vee \\ \vee (\bar{x}_{3.1}\bar{x}_{4.1}\bar{x}_{3.2}\bar{x}_{4.2} \vee \bar{x}_{3.3}\bar{x}_{4.3}\bar{x}_{3.4}\bar{x}_{4.4}).$$

Реализация такого элемента требует 32 КМОП-транзисторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авдуевский, В.С.** Надежность и эффективность в технике: Справочник [Текст]/В.С. Авдуевский; под ред. А.И. Рембезы//В 10 т.; Т. 1. Методология. Организация. Терминология.–М.: Машиностроение, 1989.–224 с.
2. **Тюрин, С.Ф.** Функционально-полные толерантные булевы функции [Текст]/С.Ф. Тюрин//Наука и технология в России.–1998.–№ 4.–С. 7–10.
3. **Тюрин, С.Ф.** Синтез адаптируемой к отказам цифровой аппаратуры с резервированием базисных функций [Текст]/С.Ф. Тюрин//Приборостроение.–1999.–№ 1.–С. 36–39.
4. **Тюрин, С.Ф.** Адаптация к отказам одновходных схем на генераторах функций с функционально-полными толерантными элементами [Текст]/С.Ф. Тюрин//Приборостроение.–1999.–№ 7.–С. 32–34.
5. **Тюрин, С.Ф.** Проблема сохранения функциональной полноты булевых функций при «отказах» аргументов [Текст]/С.Ф. Тюрин//Автоматика и телемеханика.–1999.–№ 9.–С. 176–186.
6. **Тюрин, С.Ф.** Программируемое логическое устройство: Пат. 2146840 Российская Федерация [Текст]/С.Ф. Тюрин, В.А. Несмелов, В.А. Харитонов [и др.]// Оpubл. БИ–2000.–№ 8.
7. **Тюрин, С.Ф.** Функционально-полный толерантный элемент [Текст]/С.Ф. Тюрин, О.А. Громов//Заявка на выдачу патента.–2010.
8. **Иьуду, К.** Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем: Учеб. пособие [Текст]/К. Иьуду.–М.: Высш. шк., 1989.–219 с.
9. **Тюрин, С.Ф.** Отказоустойчивый элемент 2ИЛИ-НЕ [Текст]/С.Ф. Тюрин, А.В. Греков, О.А. Громов//Заявка на выдачу патента.–2011.
10. **Греков, А.В.** Методика поиска работоспособных элементов функционально-полных толерантных цифровых схем [Текст]/А.В. Греков, А.В. Набатов, Г.О. Ольт//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление.–2009.–№ 2(76).–С. 129–133.

## МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ СИГНАЛОВ

Оценивание истинных значений пикселей изображений в той или иной степени необходимо в большинстве задач цифровой обработки изображений. Особенно данная проблема актуальна при автоматической обработке изображений, полученных в светочувствительных матрицах в цифровых фото- и видеокамерах и системах машинного зрения. Методы восстановления двумерных сигналов находят свое применение в задачах обработки архивных документов в виде изображений, имеющих различные искажения (например, царапины, пятна, пыль, ненужные надписи, линии сгиба). В видеосигналах встречаются статические изображения, которые мешают зрителю, закрывая часть полезной информации от зрителя. К таким изображениям относятся различные логотипы каналов, дата и время или субтитры, которые были наложены на видеосигнал с дальнейшим кодированием.

Большинство методов реконструкции изображений можно условно разделить на следующие группы: методы на основе решения дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) [1–3]; методы на основе ортогональных преобразований [4–7]; методы на основе синтеза текстуры [8–10].

Использование известных методов восстановления значений пикселей изображений приводит к размытию резких перепадов яркостей и контуров и требует априорной информации для выбора параметров методов. Неспособность восстанавливать текстуру изображений и изогнутые контуры ограничивает область использования данных методов, которые в основном применимы при удалении царапин и небольших дефектов на структуре изображений.

К группе методов, основанных на синтезе текстуры относится *exemplar-based methods* (EBM)

[8], заключающийся в вычислении приоритета для каждого пикселя границы с последующим поиском похожего квадратного блока в области доступных пикселей и его копировании в область отсутствующих пикселей.

К недостаткам метода следует отнести:

- видимость границ на восстановленном изображении между найденными похожими блоками;
- неправильное восстановление при отсутствии похожего блока;
- зависимость ошибки восстановления от размера блока для поиска подобия.

Цель данной статьи – уменьшение погрешности восстановления двумерных сигналов с помощью модифицированного метода на основе *exemplar-based image inpainting*.

В табл. 1 представлены значения RMSE для метода EBM при восстановлении тестовых изображений в зависимости от различных размеров блока поиска подобия, где

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (s_{i,j} - \bar{s}_{i,j})^2}{N \cdot M}}, \quad i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}.$$

В качестве тестовых выбраны изображения с различными геометрическими особенностями:

- 1) геометрические фигуры – бинарное изображение с геометрической структурой, представленной границами двух треугольников, с отсутствующим блоком пикселей в центре на пересечении четырех границ;
- 2) фрагмент изображения *Camerasmen* – фрагмент изображения с резкими перепадами яркости и отсутствующим квадратным блоком пикселей;
- 3) фрагмент изображения *Barbara* – фрагмент изображения с текстурой и отсутствующим квадратным блоком пикселей;
- 4) фрагмент изображения *Lena* – фрагмент изображения с текстурой и структурой и отсутствующим квадратным блоком пикселей.

Таблица 1

Зависимость RMSE от размера блока для различных изображений

Size of block \ Image	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Geometric shapes	34,1522	15,9586	14,0662	8,6590	9,5262	6,3980	9,6281	6,1567	6,2587	12,9473
Fragment of Cameramen	16,4594	12,6302	18,3997	12,8937	9,9134	13,3841	15,7766	13,7812	9,9367	10,2303
Fragment of Barbara	11,2524	9,42925	9,633918	10,1900	8,7511	9,7985	9,6354	9,4858	10,8206	11,7561
Fragment of Lena	11,8174	11,0699	11,7119	10,4102	12,8165	9,5307	9,7823	9,2618	9,0612	9,67334

Количество отсутствующих пикселей в квадратном блоке составляет примерно 5–12 % от общего количества пикселей изображения.

Анализ результатов, представленных в табл. 1 показывает, что для каждого типа изображений существует свой оптимальный размер блока, который зависит от их геометрических особенностей. Так, при наличии резких перепадов яркости, размеры которых сравнимы с размером изображения, необходимо выбирать больший размер блока для поиска подобия. При наличии сложной структуры и большего количества границ и перепадов яркости размер блока следует брать меньше. Значение *RMSE* в среднем изменяется на 50–150 % при увеличении размера блока от 3 до 21 пикселей. Исследование показало необходимость введения адаптации к размеру и форме блока для поиска подобия с целью уменьшения погрешности восстановления изображений.

Упрощенная математическая модель исходного черно-белого изображения представляет собой восьмибитную двумерную дискретную последовательность  $Y_{i,j}$ ,  $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}$  (рис. 1)

$$Y_{i,j} = \begin{cases} S_{i,j}, \eta_{i,j} = \{ \} \\ \eta_{i,j}, \eta_{i,j} \neq \{ \} \end{cases}$$

где  $S_{i,j}$  – доступные пиксели неискаженного изображения;  $\eta_{i,j}$  – область изображения с отсутствующими пикселями (дефекты изображений);  $\delta S$  – граница области  $S$ ;  $N$  – количество строк;  $M$  – количество столбцов двумерного массива изображения.

Предполагается, что априорная информация о геометрических особенностях изображений отсутствует, считаются известными координаты области  $\eta_{i,j}$ , при этом ее принадлежность к классу искажений неизвестна.

Обозначим множество пикселей, принадлежащих границе области восстановления, как  $\delta S_{i,j}$ ,

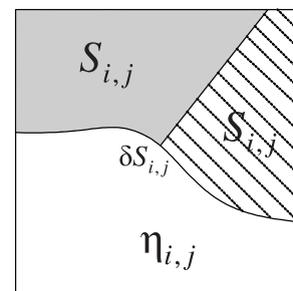


Рис. 1. Модель изображения

где  $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}$ .

На первом шаге для каждого пикселя границы  $\delta S_{i,j}$  с помощью метода LPA-ICI адаптивно определяется форма области для поиска подобия, которая формируется путем объединения двух смежных однородных подобластей в направлении максимума градиента [11].

На втором шаге вычисляется значение приоритета  $P(\delta S)$  для каждого значения пикселя границы, который состоит из двух множителей (рис. 2) [8]:

$$P(\delta S) = C(\delta S) \cdot D(\delta S), \quad (1)$$

$$C(\delta S) = \frac{\sum_{l \in \Psi_{\delta S}} C(l)}{|\Psi_{\delta S}|}, \quad D(\delta S) = \frac{|\nabla I_{\delta S}^{\perp} \cdot n_{\delta S}|}{\alpha}, \quad (2)$$

где  $\delta S_{i,j}$  – текущий пиксель на границе доступных пикселей;  $C(\delta S)$  – коэффициент доверия;  $D(\delta S)$  – коэффициент градиента;  $\Psi_{\delta S}$  – адаптивный блок пикселей с центром в пикселе  $\delta S_{i,j}$ ;  $|\Psi_{\delta S}|$  – количество пикселей адаптивного блока;  $\nabla I_{\delta S}^{\perp}$  – вектор, ортогональный градиенту в точке  $\delta S_{i,j}$ ;  $n_{\delta S}$  – вектор, ортогональный границе  $\delta S$  в точке  $\delta S_{i,j}$ ;  $\alpha$  – нормированный множитель, который для восьмибитных изображений равен 255.

Вначале предполагается, что значение коэффициента доверия  $C$  для пикселей из области  $S$  равно единице, а для области  $\eta$  равно нулю [8].

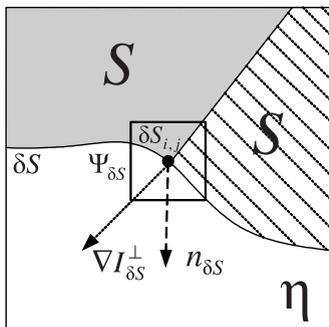


Рис. 2. Построение ортогональных векторов

Вычисление приоритета с помощью выражения (1) позволяет придавать больший вес пикселям, находящимся на перепадах яркости (границах), таким образом, восстанавливая их в первую очередь. Учет коэффициента доверия  $C(\delta S)$  позволяет присваивать меньший вес восстановленным пикселям при увеличении расстояния от доступных пикселей из области  $S$ .

Определяется пиксель  $p \in (i, j)$  с максимальным значением приоритета  $\max P(\delta S_{i,j})$  на границе  $\delta S_{i,j}$  и выбирается адаптивная область  $\Psi_p$ , принадлежащая данному пикселю (рис. 3), использование которой позволяет корректно учитывать форму области восстановления и не захватывать лишние границы, которые могут привести к неправильной реконструкции изображения.

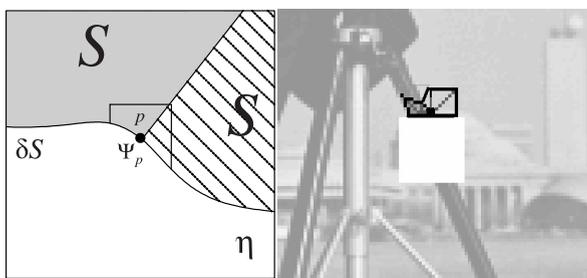


Рис. 3. Адаптивный выбор формы области для поиска подобия

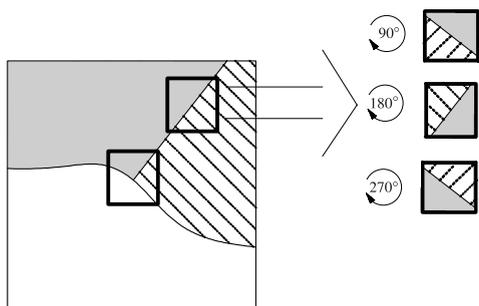


Рис. 4. Поворот блока пикселей на изображении

Далее предлагается увеличивать количество блоков, полученных из исходного изображения с доступными пикселями, путем их поворота на 90, 180, 270°(рис. 4). Данный подход позволяет уменьшить погрешность восстановления изображения за счет увеличения количества блоков и увеличения вероятности нахождения более похожего блока по евклидовой метрике.

На третьем шаге находятся блоки  $\Psi_{q^{(h)}}$ ,  $h = \overline{1, R}$  в области доступных пикселей  $S$  с учетом повернутых на 90, 180, 270°, для которых евклидова метрика минимальна (рис. 5):

$$\sqrt{\sum (\Psi_p - \Psi_q)^2} \longrightarrow \min. \quad (3)$$

Количество блоков подобия  $R$  определяется с помощью доверительного интервала:

$$\sqrt{\sum (\Psi_p - \Psi_q)^2}_{\min} + \alpha \cdot \sqrt{\sum (\Psi_p - \Psi_q)^2}_{\min} > \sqrt{\sum (\Psi_p - \Psi_{q^{(h)}})^2}, \quad (4)$$

где  $h = \overline{1, R}$ ;  $\alpha$  – уровень значимости.

Значения пикселей в области  $\eta$  смежные к пикселю с максимальным приоритетом  $p$  восстанавливаются путем усреднения соответствующих пикселей из найденных областей  $\Psi_{q^{(h)}}$  в области доступных пикселей  $S$ :  $\bar{S} = \frac{\sum_{h=1}^R \Psi_{q^{(h)}}}{R}$  [12].

Коэффициент доверия  $C$  для восстановленных пикселей присваивается равным текущему значению  $C(p)$  [8]. После чего процедура пересчета приоритета и поиска похожих областей с последующей заменой повторяется.

Исследование эффективности проводится на тестовых изображениях с отсутствующими пикселями, которые находятся на границах с резкими перепадами яркости. Оценка эффективности качества обработки изображений проводится на основе субъективного кри-

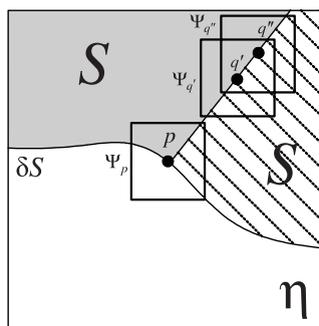


Рис. 5. Поиск похожих блоков

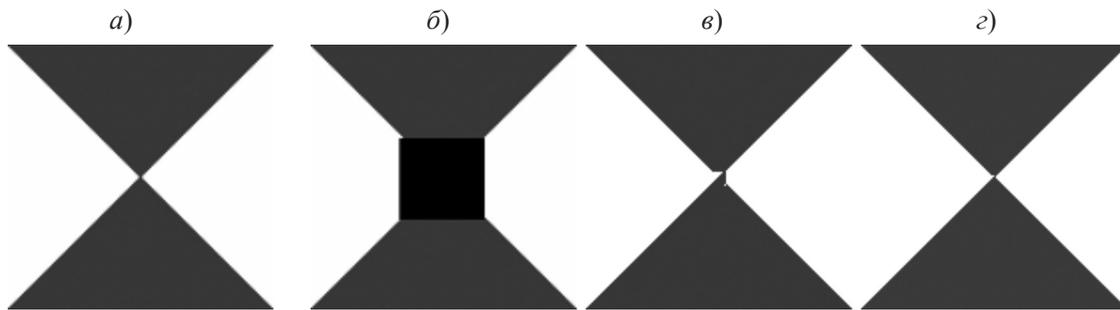


Рис. 6. Восстановление изображения с геометрическими фигурами

терия сравнения и статистических критериев, в качестве которых используются: значение среднеквадратического отклонения разности между оценкой полезного двумерного сигнала и его модели

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (S_{i,j} - \bar{S}_{i,j})^2 / N \cdot M},$$

оценка отношения сигнала/шум

$$SNR = 10 \cdot \lg \left( \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M S_{i,j}^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (S_{i,j} - \bar{S}_{i,j})^2} \right),$$

пиковое отношение сигнал/шум  $PSNR = 20 \cdot \lg(\max(S) / RMSE)$ , оценка средней абсолютной ошибки

$$MAE = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |S_{i,j} - \bar{S}_{i,j}| / N \cdot M,$$

оценка максимума абсолютной разности  $MAX = \max |S - \bar{S}|$ , где  $i = 1, N, j = 1, M$ .

На рис. 6 представлен пример восстановления изображения с геометрическими фигурами, на

рис. 7 – пример восстановления фрагмента изображения Cameramen, на рис. 8 – пример восстановления фрагмента изображения Lena, на рис. 9 – пример восстановления изображения Barbara с боком потерянных пикселей на текстуре (а – исходное изображение; б – изображение с отсутствующим блоком пикселей; в – изображение, восстановленное методом EBM; г – изображение, восстановленное предложенным методом).

Особенностью данного тестового изображения является то, что область с отсутствующими пикселями находится на пересечении четырех границ, которые необходимо экстраполировать, соединив соответственные противоположные границы. Предложенный метод реконструкции значений пикселей позволяет «правильно» восстановить границы изображения, а на изображении, восстановленном методом EBM, наблюда-

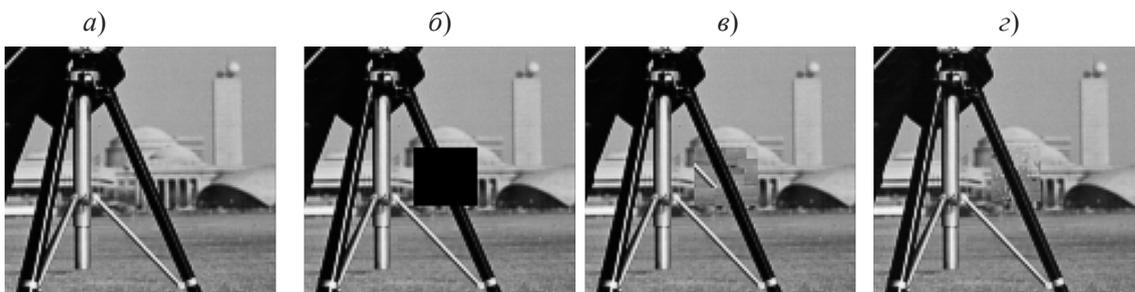


Рис. 7. Восстановление фрагмента изображения Cameramen

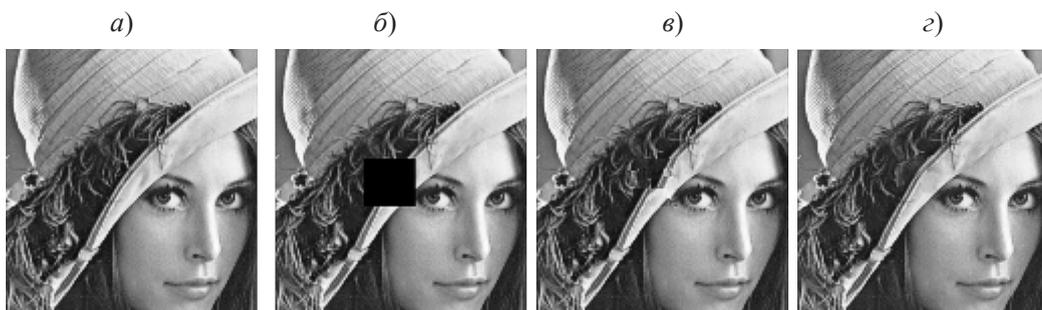


Рис. 8. Восстановление фрагмента изображения Lena

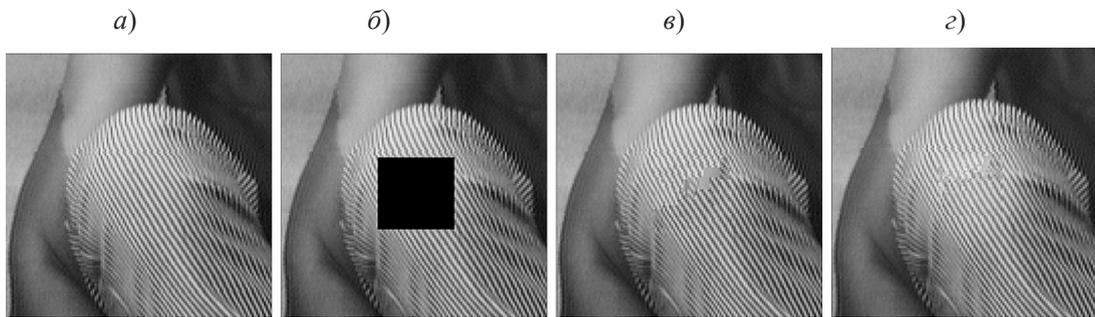


Рис. 9. Восстановление фрагмента изображения Barbara

ются ошибки из-за того, что происходит замена всех пикселей из найденных похожих блоков.

Анализ результатов обработки показывает, что предложенный метод позволяет корректно восстановить границы изображения.

Из анализа результатов обработки следует, что при использовании предложенного метода реконструкции значений пикселей структура изображения, представленная границей шляпы на фрагменте изображения Lena, восстанавливается «правильно». Также следует отметить, что предложенный метод не приводит к размытию текстуры и структуры при восстановлении больших областей с потерянными пикселями. При обработке методом EBM остаются заметными незначительные искажения на фоне «бортов» шляпы.

При обработке методом EBM наблюдается зависимость эффективности восстановления от размера блока при поиске подобия, который выбирается на основе априорной информации о геометрических особенностях изображения. Предложенный метод имеет преимущество при реконструкции как текстурных участков, так и мелких деталей изображения. Особенно это преимущество проявляется для структуры, характеризующейся

перепадами яркости, границами и контурами.

В табл. 2 представлены значения погрешностей обработки для предложенного метода и метода EBM при наилучших значениях параметров обработки для рассмотренных тестовых изображений. Стоит отметить, что количественные значения погрешностей подтверждают визуальный анализ. При использовании разработанного метода реконструкции изображений значения погрешностей в среднем на 30–40 % меньше, чем при обработке методом EBM.

В статье предложен метод восстановления значений двумерных сигналов на основе синтеза текстуры и структуры изображений, на основе модификации метода EBM. Модификация позволяет выбрать субоптимальную адаптивную форму и размер блока, для которого находятся похожие блоки. Предлагаемый метод позволяет синтезировать текстуру с одновременным восстановлением структуры изображения и получить меньшую ошибку восстановления, чем традиционный метод в среднем на 30–40 %.

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

Таблица 2

Зависимость погрешности обработки для различных изображений

	RMSE		SNR		PSNR		MAE		MAX	
	Метод EBM	Предложенный метод								
Geometric shapes	6,156	1,897	29,333	39,701	32,201	42,568	0,229	0,051	200	200
Fragment of Cameramen	9,913	6,179	22,553	26,616	28,185	32,311	1,763	0,836	129	107
Fragment of Barbara	8,751	7,477	23,306	24,627	29,289	30,655	1,898	1,399	115	97
Fragment of Lena	9,061	5,956	24,130	27,734	28,987	32,630	1,245	0,651	191	174

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bertalmio, M.** Navier-Stokes, fluid dynamics, and image and video inpainting [Текст]/M. Bertalmio, A. Bertozzi, G. Sapiro//Hawaii: Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2001. –С. 213–226.
2. **Perona, P.** Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [Текст]/P. Perona, J. Malik// IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.–1990.–№ 12(7).–P. 629–639.
3. **Ballester, C.** Filling-in by joint interpolation of vector fields and gray levels [Текст]/C. Ballester, M. Bertalmio, V. Caselles [et al.]/IEEE Trans. On Image Proc.–2001.–№ 10(8).–P. 1200–1211.
4. **Alkachouh, Z.** Fast DCT-based spatial domain interpolation of blocks in images [Текст]/Z. Alkachouh, M.G. Bellanger//IEEE Trans. Image Proc.–2000. –Vol. 9.–№ 4.–P. 729–732.
5. **Park, J.W.** DCT coefficients recovery-based error concealment technique and its application to the MPEG-2 bit stream error [Текст]/J.W. Park, J.W. Kim, S.U. Lee// IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.–1997.– Vol. 7.–№ 6.–P. 845–854.
6. **Guleryuz, O.G.** Nonlinear approximation based image recovery using adaptive sparse reconstructions and iterated denoising [Текст]/O.G. Guleryuz //Part I: theory IEEE transactions on image proc.–2006.–Vol. 15.–№ 3.
7. **Elad, M.** Simultaneous cartoon and texture image inpainting using morphological component analysis (MCA) [Текст]/M. Elad, J. Starck, P. Querre, [et al.]/Applied and Computational Harmonic Analysis.–2005.–Vol. 19. –№ 3.–P. 340–358.
8. **Criminisi, A.** Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting [Текст]/A. Criminisi, P. Perez, K. Toyama//IEEE Trans. Image Proc.–2004.–№ 13(9).–P. 28–34.
9. **Bertalmio, M.** Simultaneous texture and structure image inpainting [Текст]/M. Bertalmio, L. Vese, G. Sapiro [et al.]/Proc. of the International Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition.–2003.–P. 707–712.
10. **Gabriel, P.** Peyre Texture synthesis with grouplets [Текст]/P. Gabriel//IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence.–2010.–Vol. 32.–№ 4.
11. **Katkovnik, V.** Local Approximation techniques in signal and image processing/V. Katkovnik, K. Egiazarian, J. Astola.–Bellingham, Washington, 2006.–P. 553.
12. **Марчук, В.И.** Метод восстановления значений двумерных сигналов на основе синтеза текстуры и структуры изображений [Текст]/В.И. Марчук, В.В. Воронин, А.И. Шерстобитов//Электротехнические и информационные комплексы и системы: научно-технический и теоретический журнал.–М.: РГУТиС.–2010.–№ 2.–Т. 6.–С. 25–33.

УДК: 519.87

К23

*Т.Н. Каримов, Л.А. Симонова*

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ**

При осуществлении закупок и доставки материальных ресурсов перед производителями товаров стоит вопрос оперативного управления товаропотоками транспортного предприятия, который напрямую влияет на их конкурентоспособность [5]. Решение задачи оперативного управления товаропотоками можно представить в виде комплекса подзадач.

Анализ состояния исследований в Российской Федерации и за рубежом показал, что достаточно эффективно функционируют системы, решающие специализированные задачи, например, такие, как моделирование оптимального маршрута между двумя населенными пунктами («Навигатор», «Бизнес ПРО», «rtoLOG» и т. д), а также геоинформационные системы (ГИС), позволяющие создавать и обновлять картографические данные. Кроме указанных систем имеются системы развоза товаров по потребителям внутри города (система «GWX Active X Control»), и по региону (система «Деловая карта», программа «TopLogistic», «ANTOR Logistics Master», «ИнтерПрог», «Бизнес Про», «Trans Trade»). Однако все эти и другие известные системы имеют, по мнению ведущих специалистов, достаточно существенные недостатки, заставляющие потенциальных потребителей, транспортные компании РФ осторожно относиться к приобретению существующих информационных логистических транспортных систем. Применяемые в этих системах математические модели, методы и алгоритмы обработки, хранения, передачи информации не соответствуют уровню решаемых практических задач. Поэтому необходима разработка моделей, алгоритмов и программного комплекса, которые должны устранить основные недостатки существующих информационно-транспортных систем, в т. ч.:

неприемлемую для производственных условий длительность оперативного определения оптимального грузопотока (нахождение компактных групп расположения получателей, поиск оптимальных маршрутов между получателями и развоза товаров);

отсутствие функциональной возможности оптимального разбиения всей зоны (некоторого региона России) на сектора развоза и оптимального закрепления этих секторов за логистическими (распределительными) центрами и складами;

достаточно большую трудоемкость и сложность внедрения и эксплуатации существующих логистических транспортных систем, связанных с необходимостью приобретения других дополнительных программных средств и различных баз данных, а также требованием высокого уровня квалификации как в области управления транспортировкой, так и в области информационных технологий;

неопределенность в вопросе оптимальности решения пользовательских задач, т. к. пользователям–заказчикам не раскрывается суть применения алгоритмов и методов и не дается обоснование выбора тех или иных методов.

Анализ имеющихся методов, показывает, что для разработки данного программного комплекса необходимо создание моделей на основе сочетания теории графов, алгоритмов кластеризации, методов динамического программирования с использованием базы прецедентов и формирования базы знаний. При этом создаваемые модели и методы должны базироваться на алгоритмах динамического разбиения территории на кластеры потребителей и формирования альтернативных маршрутов с целью учета реальных требований в виде следующих условий и ограничений.

По потребителям:  
объем, вес и вид товара для каждого потреби-  
теля, а также необходимое время привоза;  
специальные условия, влияющие на время  
выгрузки товара.

По автотранспортным средствам (АТС):  
вместимость, грузоподъемность, тип кузова и  
удобство загрузки/выгрузки товара;

средняя базовая норма расхода топлива и  
средняя расчетная скорость при езде по дорогам  
типа асфальт, щебень, грунт;

разрешение проезда АТС по тем или иным  
типам дорог и заезда в другие промежуточные  
склады и базы;

расчетное время выезда и необходимое время  
приезда в исходный пункт [8].

Для решения поставленных проблем разрабо-  
тана структура системы оперативного управления  
товаропотоками с элементами системы поддержки  
принятия решений, которая приведена на рис. 1.

Программный комплекс должен выполнять  
следующие функции:

формирования исходной информации по на-  
селенным пунктам и АТС;

кластеризации номенклатуры продукции и ло-  
гической группировки АТС по ряду признаков;

моделирования минимальных маршрутов  
между соседними пунктами назначения;

кластеризации населенных пунктов на основе  
метода MST;

кластеризации АТС для обслуживания кла-  
стеров населенных пунктов;

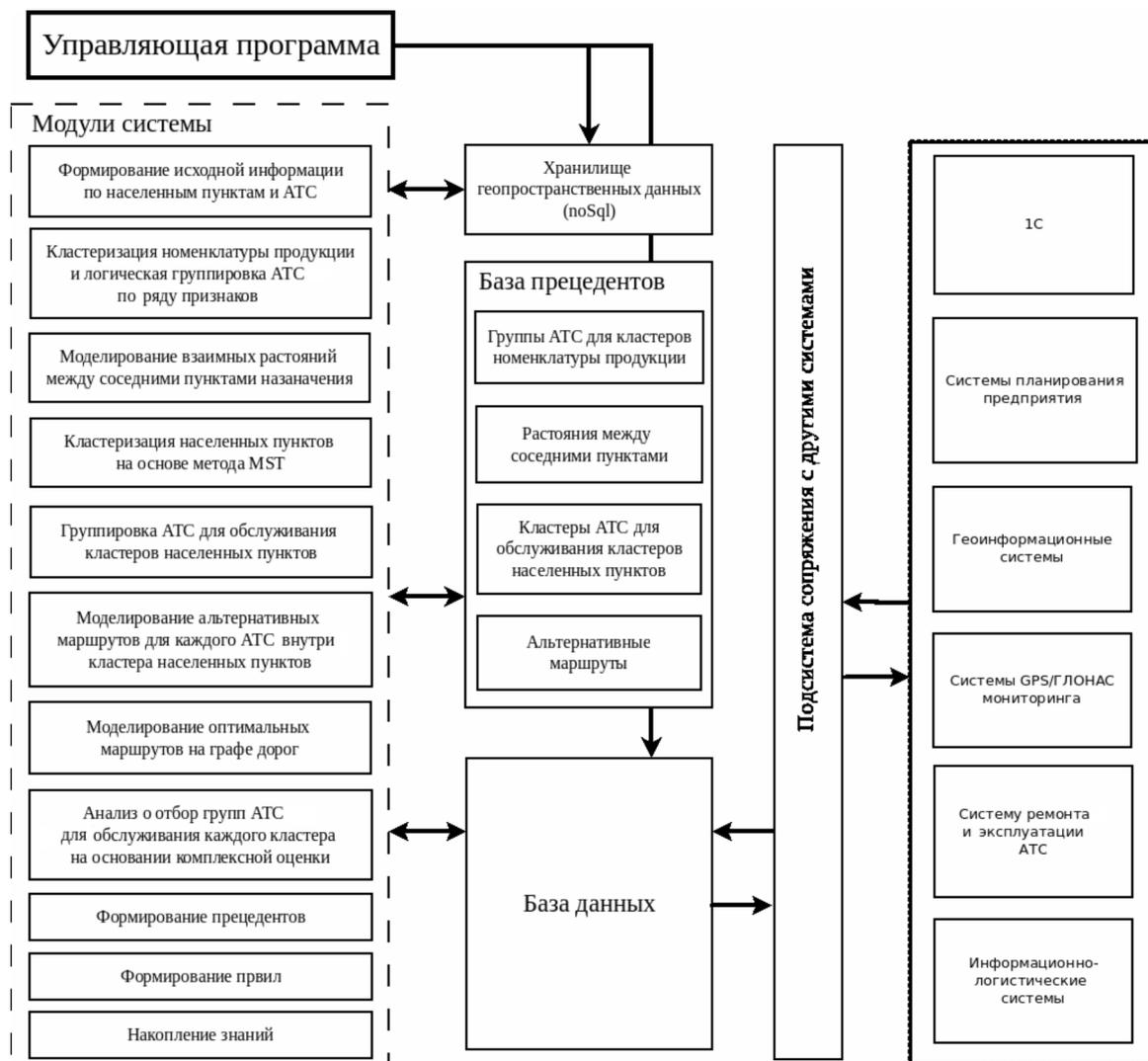


Рис. 1. Структура системы оперативного управления товаропотоками с элементами системы поддержки принятия решений

моделирования альтернативных маршрутов для любого АТС внутри кластера;  
 моделирования оптимальных маршрутов на графе дорог;

анализа и отбора группы АТС для каждого кластера населенных пунктов на основе комплексной оценки;  
 формирования выходной информации (марш-

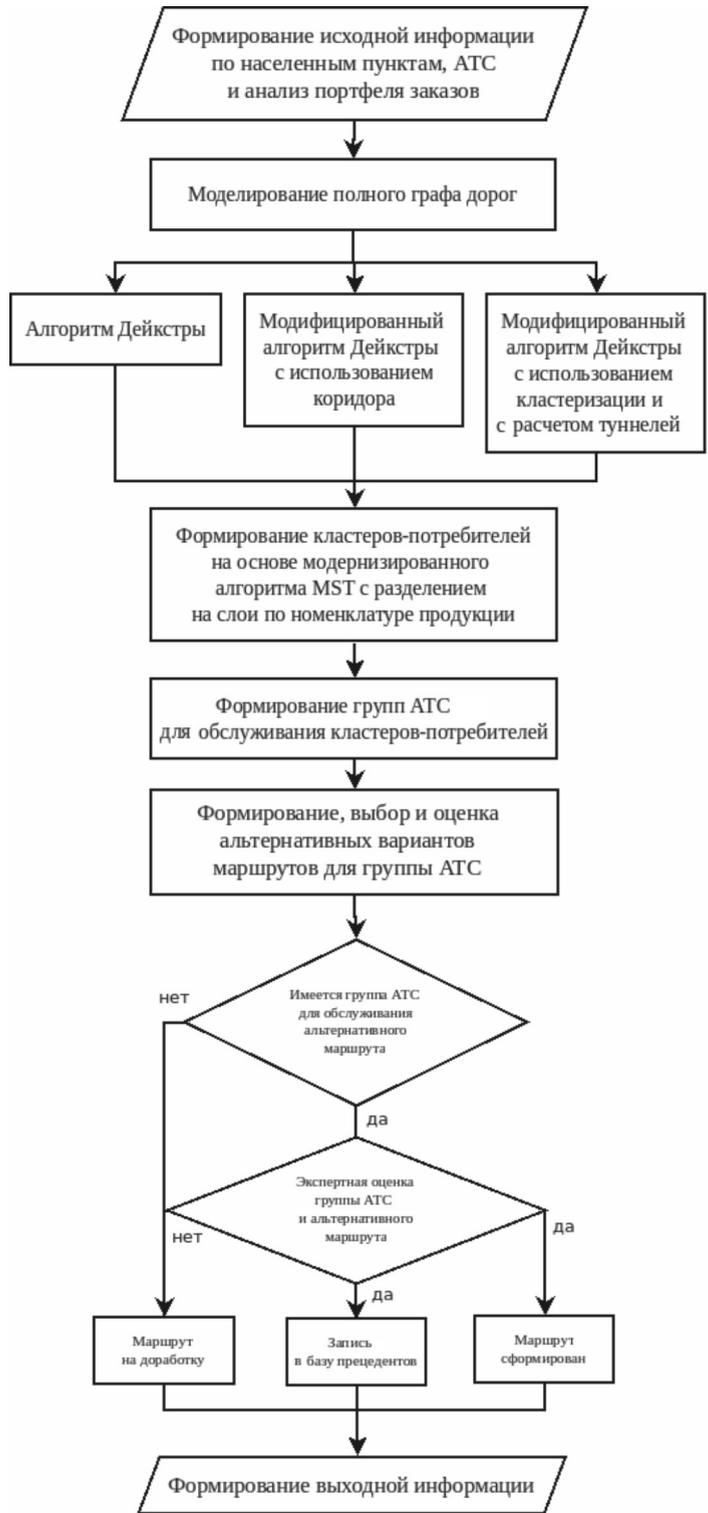


Рис. 2. Функциональная модель оптимизации грузопотоков

рутных листов с картой проезда).

На основе структуры системы оперативного управления товаропотоками с элементами системы поддержки принятия решений разработаны математические модели и алгоритмы, создан программный комплекс, общая структура которого изображена на рис. 2.

Здесь на начальном этапе происходит формирование исходной информации по населенным пунктам и АТС, а также анализ портфеля заказов, где содержится информация о пунктах назначения товаров, сроках выполнения заказов и список доступных АТС. Результатом являются сформированные группы по номенклатуре продукции и кластеры АТС [6].

Для реализации функции кластеризации на основе модернизированного алгоритма MST необходимо моделирование полного графа дорог, который реализуется на основе алгоритма Дейкстры и его модификаций. В ходе анализа графа дорог было выявлено, что алгоритм Дейкстры эффективно использовать при расчете минимальных маршрутов между товарополучателями (при графе до 25 000 вершин) при расчетах на относительно небольших территориях (например, некоторого региона РФ). В случае больших территорий необходима модернизация алгоритма Дейкстры [4].

Предлагается при графе до 150 000 вершин использовать в алгоритме применение коридора поиска минимального пути, а при графе до 950 000 вершин – разбиение территорий на искусственные кластеры.

Использование коридора позволяет не рассматривать и не загружать в оперативную память ЭВМ те вершины и ребра, которые явно не будут участвовать в вычислении оптимального маршрута.

В первом случае математическое преобразование графа будет выглядеть следующим образом:

$$G' := (V', E'), \quad (1)$$

где  $V' = \{V|W(V)\}$ ,  $W(V)$  – вершины в коридоре;  $E' = \{E|M(E)\}$ ,  $M(E)$  – ребра в коридоре.

Во втором случае математическое описание преобразования графа будет:

$$G' := \{V, E\} \Rightarrow G' = \{\omega, \psi\}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – веса кластера, вершины нового графа;  $\psi$  – ребра графа, рассчитанные на пространственных данных.

В данном случае принимаем, что весом кластера является его географический центр.

Внутри кластера происходит предварительное построение маршрутов, проходящих через этот кластер, на основе алгоритма Дейкстры. Применительно к кластеру принимаем маршруты как возможные туннели через кластер. Количество таких туннелей для всей территории огромно, и для быстрого доступа используются современные решения в области хранилища данных на основе технологии posql [7]. Для нахождения направления возможного минимального маршрута используем новый граф и переходим к формированию альтернативных вариантов маршрутов. Далее производится расчет всего альтернативного маршрута на основании данных по туннелям, проходящих через каждый кластер. Методом попарных сравнений получаем маршрут с минимальной длиной [3].

На основе описанной выше функции производим кластеризацию. В ходе анализа алгоритмов кластеризации выделен метод MST, который с помощью минимальных остовных деревьев выделяет кластеры произвольной формы, выбирает из нескольких оптимальных решений самое оптимальное. Для построения минимального остовного дерева используется алгоритм Крускала [2]. Однако для решения поставленной задачи был модернизирован метод MST, в который были введены корректирующие правила. Итог работы данной функции – сформированные кластеры потребителей которые являются входными данными для следующей функции [1].

На начальном этапе формирование групп АТС для обслуживания кластера потребителей производится на основе экспертной оценки [10]. На основе полученных данных формируются правила отбора группы АТС.

Например, правило для проверки возможности группы машин обслужить кластер будет выглядеть так: «Если масса группы машин больше массы кластера на 10 % или равна и объем группы машин больше или равен объему кластера, то группа предположительно может обслужить кластер».

В математическом виде правило имеет вид:

$$M_{\text{кл}} \leq M_{\text{АТС}} \leq M_{\text{недогруз}} \text{ и } V_{\text{кл}} \leq V_{\text{АТС}}, \quad (3)$$

где  $M_{\text{недогруз}} = M_{\text{кл}} + (M_{\text{кл}} \cdot 0,1)$  – масса допустимого недогруза АТС.

На основе полученных выше данных происходит формирование, выбор и оценка группы



АТС для обслуживания кластера на основе решения задачи динамического программирования. Пользователь может задать приоритет, по которому будет производиться отбор АТС с учетом всех факторов, например, по минимальному времени обслуживания кластера и расстоянию, минимальному недогрузу АТС и расходу топлива и т. д. Система на основе экспертной оценки выставит соответствующие веса для каждого условия. В итоге система выдает самую оптимальную группу АТС, учитывающую все факторы [9].

Формирование выходной информации включает:

маршрутный лист водителя (с картографической информацией, с нанесением всех важных поворотов и населенных пунктов для лучшего ориентирования водителя);

вся отчетная информация по средствам подсистемы сопряжения передается в соответствующие системы предприятия, где могут быть составлены отчеты по профилю каждой из систем.

Подсистема сопряжения с другими системами дает возможность использовать данные из существующих информационных систем а

также в удобном виде осуществлять обратную связь.

Апробация разработанных методов и алгоритмов была проведена на конкретных примерах и показала, что можно сократить время работы алгоритмов в 7–10 раз. Например, длительность работы на 120 точках составляла 100 мин, после проведенных модификаций время работы составило 10 мин.

Применение системы принятия решений в программном комплексе позволит с учетом недостатков существующих информационных логистических транспортных систем обеспечить сокращение времени работы алгоритмов без снижения их качественных показателей, и применить их для построения оптимальных маршрутов на больших маршрутных графах на разных этапах с учетом вместимости, использования различных типов транспортных средств и загрузки. Предусмотренная база знаний на основе прецедентов поможет повысить качество формируемых моделей за счет выбора оптимальных вариантов по каждой задаче.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нейский, И.М.** Классификация и сравнение методов кластеризации [Текст]/И.М. Нейский//Интеллектуальные технологии и системы. Сб. учеб.-метод. работ и статей аспирантов и студентов.–М.: НОК «CLAIM», 2006.–Вып. 8.–С. 130–142.

2. **Емеличев, В.А.** Многокритериальные задачи об остовах графа [Текст]/В.А. Емеличев, В.А. Перепелица//Докл. РАН.–1998.–№ 298.–С. 544–547.

3. **Гилл, Ф.** Практическая оптимизация [Текст]/Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт; пер. В.Ю.Лебедева.–М.: Мир, 1985.–С. 287–288.

4. **Загороднев, Д.И.** Применение методов решения транспортной задачи для автоматического управления транспортными потоками предприятия [Текст]/Д.И. Загороднев, Л.А. Симонова//Проектирование и исследование технических систем: Межвуз. науч. сб.–Набережные Челны: ИНЭКА, 2009. –Вып. 14. –С. 56–65.

5. **Сергеев, В.И.** Логистика: Информационные системы и технологии: Учебно-практическое пособие [Текст]/В.И. Сергеев, М.Н. Григорьев, С.А. Уваров.–Альфа-Пресс, 2008.–С. 6–10

6. **Черноморов, Г.А.** Теория принятия решений:

Учеб. пособие [Текст]/Г.А. Черноморов//Изв. вузов. Сер. Электромеханика, Новочеркасск: Юж.-Рос. ГТУ, 2002.–С. 262–266

7. **Каримов, Т.Н.** Разработка автоматизированной системы формирования геоинформационной базы данных для решения задач транспортной логистики [Текст]/Т.Н. Каримов//Образование и наука – производству: Сб. тр. Междунар. науч.-техн. и образоват. конф.–Набережные Челны: ИНЭКА, 2010.–С. 194–196.

8. **Каримов, Т.Н.** Построение адаптивно пассивных алгоритмов для решения задач информационной логистической транспортной системы [Текст]/Т.Н. Каримов, С.Н. Тимергалиев, А.Х. Хайруллин//Образование и наука – производству: Сб. тр. Междунар. науч.-техн. и образоват. конф.–Набережные Челны: ИНЭКА, 2010.–С. 197–200.

9. **Кини, Р.Л.** Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения [Текст]/Р.Л. Кини., Х. Райфа; пер. В.В.Подиновский.–М.: Радио и связь, 1981.–С. 272–276.

10. **Луценко, Е.В.** Интеллектуальные информационные системы: Учеб. пособие [Текст]/Е.В. Луценко.–Краснодар: КубГАУ, 2004.–С. 302–307.

УДК 004.896; 519.876.5

*К.А. Аксенов, Е.М. Сафрыгина, Л.Г. Доросинский*

## **РАСШИРЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ**

В статье рассматриваются некоторые технологии интеграции интеллектуальных средств поддержки решений (СППР) в состав BPsim4, базирующихся на аппарате нечеткой логики, в частности, расширение системы моделирования BPsim.MAS аппаратом нечеткого управления (нечетких контроллеров) и реализация системы многокритериального анализа по схеме Беллмана–Заде на базе модуля BPsim.MSN.

BPsim4 – многофункциональный программный комплекс поддержки принятия решений в сфере управления организационно-техническими системами (ОТС) [1]. Комплекс BPsim4 в настоящий момент состоит из двух основных программных модулей: системы динамического моделирования мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР) BPsim.MAS и системы технико-экономического проектирования организационно-технических систем BPsim.MSN. При разработке данных модулей использовались технологии мультиагентного, ситуационного, имитационного и экспертного моделирования.

### **Реализация аппарата нечеткого управления на базе модуля имитационного моделирования BPsim.MAS**

Нечеткая логика предназначена для формализации человеческих способностей к неточным или приближенным рассуждениям, которые позволяют более адекватно описывать ситуацию с неопределенностью. Методы нечеткой логики полезны при моделировании сложных технологических и бизнес-процессов, если моделируемые объекты являются слишком сложными для анализа с помощью общепринятых количественных методов или когда доступные источники информации интерпретируются качественно, неточно или неопределенно (например, эвристические знания экспертов, представленные в виде выражений на естественном языке). Исходным понятием нечеткой логики является понятие элементарного нечеткого высказывания – повествовательного

предложения, выражающего законченную мысль, относительно которой можно судить об ее истинности или ложности с некоторой степенью уверенности.

Так, при проектировании моделей технологических процессов (например, цикла фабричного производства) аппарат нечеткого управления может быть использован в качестве механизма саморегуляции или генерации случайных внешних воздействий на систему; в бизнес-системах нечеткая логика интересна, прежде всего, как возможность использования базы эвристических знаний различных специалистов при моделировании бизнес-процессов, функций или проектов, реализуемых какой-либо компанией.

В приведенных выше примерах, т. е. при разработке динамических моделей процессов преобразования ресурсов, нечеткая логика используется как один из элементов алгоритмического обеспечения системы моделирования и реализуется при помощи аппарата нечетких контроллеров. Общая схема такого контроллера приведена на рис. 1. Обработка нечеткой информации осуществляется следующим образом: точные исходные данные с датчиков, контролирующих объект управления, переводятся в значения лингвистических переменных в специальном блоке, получившем название «фаззификатор». Далее реализуются процедуры нечеткого вывода на множестве продукционных правил, составляющих базу знаний системы управления, в результате чего формируются выходные нечеткие множества, которые переводятся в точные значения результатов вычислений в блоке «дефаззификатор». На выходе последнего формируются управляющие сигналы, подаваемые на исполнительные механизмы объекта управления [2].

Нечеткая база знаний предназначена для формального представления эмпирических знаний или знаний экспертов в той или иной проблемной области и представляет собой базу правил нечетких продукций, в которых условия и заключения сформулированы в терминах нечетких лингви-

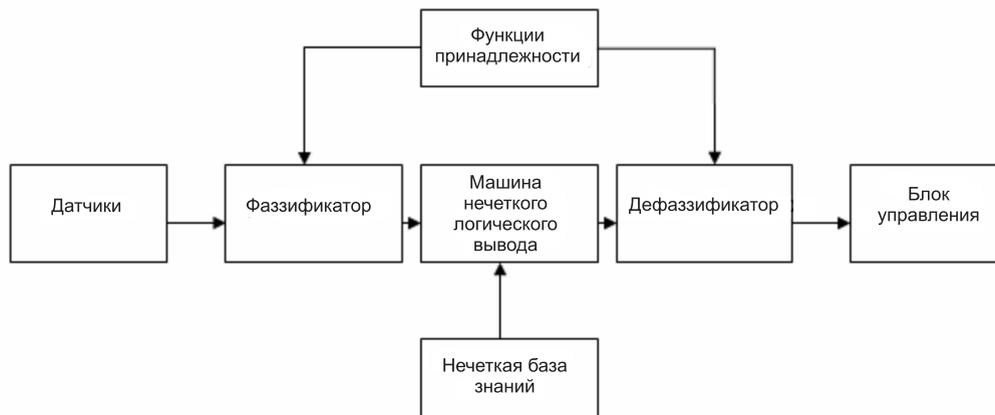


Рис. 1. Концептуальная схема нечеткого контроллера

стических высказываний. Чаще всего база знаний/правил (БЗ) представляется в форме структурированного текста:

ПРАВИЛО\_1. ЕСЛИ «Условие\_1»  
ТО «Заключение\_1» ( $F_1$ )

ПРАВИЛО\_2. ЕСЛИ «Условие\_2»  
ТО «Заключение\_2» ( $F_2$ )

...

ПРАВИЛО\_n. ЕСЛИ «Условие\_n»  
ТО «Заключение\_n» ( $F_n$ ),

где  $F_i$  ( $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ) обозначают коэффициенты определенности или весовые коэффициенты соответствующих правил. Эти коэффициенты могут принимать значения из интервала  $0 \div 1$ .

Процедура нечеткого вывода по БЗ состоит из следующих шагов:

1. *Фаззификация входных переменных.* Под фаззификацией понимается процедура нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных (не нечетких) исходных данных. Фаззификацию еще называют *введением нечеткости*.

2. *Агрегирование подусловий* в нечетких правилах продукций. Агрегирование представляет собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода.

3. *Активизация или композиция подзаключений* в нечетких правилах продукций. Активизация в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечетких продукций.

4. *Аккумуляция заключений нечетких правил продукций.* Аккумуляция или аккумулярование в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Цель аккумуляции заключается в том, чтобы объединить все степени истинности заключения (подзаключений) для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных.

5. *Дефаззификация.* Дефаззификация в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения обычного (не нечеткого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных. Цель дефаззификации заключается в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить обычное количественное значение (crisp value) каждой из выходных переменных, которое может быть использовано специальными устройствами, внешними по отношению к нечеткому контроллеру (блоком управления).

**Технология реализации нечетких контроллеров в среде VPsim.MAS.** Нечеткий контроллер в VPsim.MAS состоит из множества объектов, являющихся частью программной среды данного модуля – блоков (операций, агентов, правил, средств, ресурсов и заявок), с одной стороны, и множества объектов сервера MS SQL, с другой (библиотеки пользовательских процедур и функций, реализующих алгоритм нечеткого вывода, таблицы протоколирования заявок, триггера, запускающего алгоритм нечеткого вывода при пе-



Рис. 2. Схема взаимодействия BPSim.MAS и нечеткого контроллера

редаче в таблицу заявки соответствующего типа). Взаимодействие между исполняемой средой модуля BPSim.MAS и сервером в ходе работы контроллера осуществляется при помощи механизма пользовательских заявок, в которые могут быть «упакованы» все необходимые исходные данные, а также разделяемой таблицей протоколирования заявок MessPar\_Protocol, расположенной на SQL-сервере. Схема взаимодействия модуля BPSim.MAS и сервера представлена на рис. 2.

Для исследования возможности применения интегрированной нечетко-имитационной среды BPSim.MAS при решении задач из области проектирования систем управления авторами выбрана модель «Разработка программного обеспечения», разработанная для Уральского государственного технического университета – УПИ (УГТУ–УПИ) два года назад [3]. Данная модель представляет собой реализацию водопадного и спирального вариантов развертывания программно-технического комплекса в рамках задачи обследования учебного процесса УГТУ и формирования ТЗ на единую информационную систему (ЕИС) университета и предназначена для оценки сроков выполнения проекта. При помощи аппарата нечетких контроллеров в данной модели решена задача автоматического подбора и регулирования состава команд исполнителей на различные этапы проекта. На рис. 3 представлена блок-схема модели с элементом нечеткого контроллера, содержащего базу продукционных правил, которые используются руководителями проектов при наборе исполнителей в проектные команды, а также блоки для загрузки исходных данных на сервер и выгрузки результатов их обработки. Результатом работы нечеткого контроллера являются показатели численного состава команд системных аналитиков, архитекторов, программистов и тестировщиков.

### Реализация алгоритма многокритериального анализа в BPSim.MSN

Еще одним перспективным приложением нечеткой логики в составе программного комплекса BPSim4 является реализация систем оценки альтернативных вариантов решения на основе технологии нечеткого многокритериального анализа (при решении задач бизнес-планирования и технико-экономического проектирования ОТС). Применение данного метода позволяет решить проблему представления и обработки нечетких исходных данных, изначально собранных в виде сравнительных экспертных оценок, при проектировании проблемно-ориентированных СППР в BPSim.MSN.

При нечетком многокритериальном анализе альтернативных вариантов используется схема Беллмана–Заде [3]. Если множество вариантов обозначить через  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ , а множество различных критериев оценки данных вариантов через  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ , то наилучший вариант из  $X$  рассчитывается как элемент с наибольшим значением степени принадлежности к нечеткому множеству:

$$\bar{D} = \tilde{G}_1 \cap \tilde{G}_2 \cap \dots \cap \tilde{G}_n = \left\{ \frac{\min_{i=1,n} \mu_{G_i}(x_1)}{x_1}, \frac{\min_{i=1,n} \mu_{G_i}(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\min_{i=1,n} \mu_{G_i}(x_k)}{x_k} \right\}, \quad (1)$$

$$\text{где } \tilde{G}_i = \left\{ \frac{\mu_{G_i}(x_1)}{x_1}, \frac{\mu_{G_i}(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\mu_{G_i}(x_k)}{x_k} \right\}, \quad (2)$$

а  $\mu_{G_i}(x_j)$  – степень принадлежности варианта  $x_j$  нечеткому множеству  $\tilde{G}_i$ .

Значения  $\mu_{G_i}(x_j)$ ,  $j = \overline{1, k}$  рассчитываются как координаты собственного вектора  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  матрицы  $A_i$  парных сравнений вариантов  $\{x_k\}$  по каждому критерию  $G_i$ :

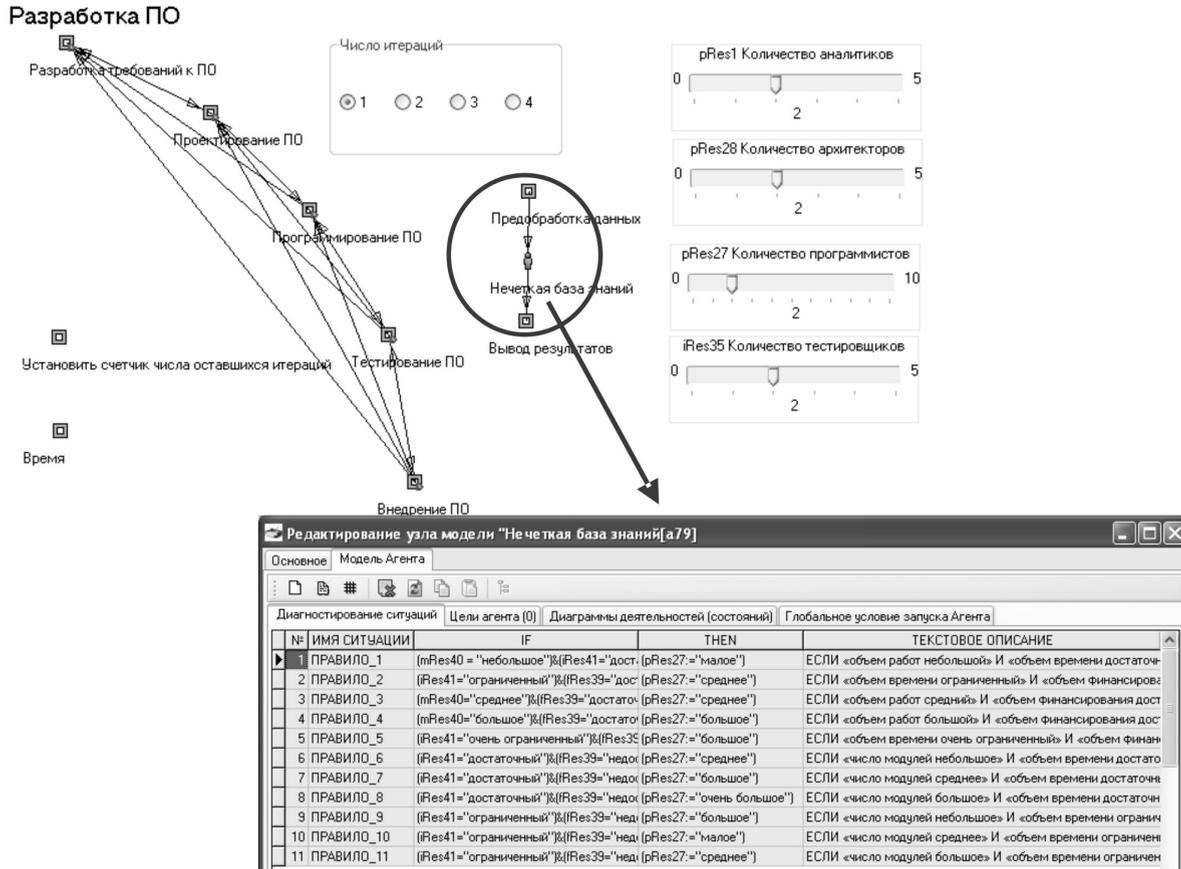


Рис. 3. Модель управления разработкой программного обеспечения (ПО) с элементом нечеткого контроллера в среде BPsim.MAS

$$A_i = \begin{matrix} x_1 & x_2 & \dots & x_k \\ x_1 & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ x_2 & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_k & a_{k1} & a_{k2} & \dots & a_{kk} \end{matrix}, i = \overline{1, n} \quad (3)$$

где  $a_{ij}$  – уровень преимущество проекта  $x_i$  над  $x_j$  по отношению к критерию  $G_i$ . Значения  $a_{ij}$  определяются по девятибалльной шкале Саати:

- 1 – если отсутствует преимущество элемента  $x_i$  над элементом  $x_j$ ;
- 3 – если имеется слабое преимущество  $x_i$  над  $x_j$ ;
- 5 – если имеется существенное преимущество  $x_i$  над  $x_j$ ;
- 7 – если имеется явное преимущество  $x_i$  над  $x_j$ ;
- 9 – если имеется абсолютное преимущество  $x_i$  над  $x_j$ ;
- 2, 4, 6, 8 – промежуточные сравнительные оценки, полученные из базовых оценок 1, 3, 5, 7, 9 путем добавления модальных значений «очень» и «почти».

Собственный вектор  $W$ , соответствующий наибольшему по величине собственному значению  $\lambda_{\max}$  симметричной матрицы  $A$  может рассчитываться при помощи численного алгоритма степенного метода [4]. Данный метод выполняет итерации для вектор-функции  $\phi(v) = \pm \frac{Av}{|Av|}$ . Итерации начинаются с единичного вектора  $e_1$  и дают последовательность векторов  $e_{n+1} = \phi(e_n)$ . Применение степенного метода при нахождении собственного вектора матрицы позволяет реализовать алгоритм нечеткого анализа в виде набора процедур на языке T-SQL, являющемся встроенным языком BPsim.MSN.

### Реализация алгоритма нечеткого многокритериального анализа в СППР

В качестве объекта для внедрения рассмотренного выше метода нечеткого анализа в среде программного модуля BPsim.MSN выбрана модель «Анализ и выбор путей реализации ЕИС университета» [3]. Данная модель является частью

комплекса моделей «Управление инфраструктурой вуза», с помощью которого были проанализированы и обоснованы управленческие решения в области информатизации УГТУ–УПИ.

В ходе проектирования модели разработки и внедрения ЕИС были определены следующие возможные альтернативы:

$x_1$  – разработка и внедрение ЕИС совместно с компанией NAUMEN;

$x_2$  – собственная разработка модулей ЕИС и их внедрение, например на основе средств разработки компании MICROSOFT;

$x_3$  – адаптация ЕИС Академии народного хозяйства (АНХ);

$x_4$  – внедрение решения IBS;

$x_5$  – внедрение решения «Университет» компании REDLAB на базе ERP-системы SAP.

Для оценки данных проектных альтернатив предлагалось использовать следующие критерии (при этом точная количественная информация по данным показателям отсутствовала):

$G_1$  – общая стоимость проекта;

$G_2$  – затраты на внедрение;

$G_3$  – эксплуатационные затраты;

$G_4$  – капитальные затраты;

$G_5$  – наличие опыта внедрения;

$G_6$  – функциональные характеристики.

При экспертном сравнении проектов  $x_1, \dots, x_4$  по критериям  $G_1, G_2, \dots, G_6$  были получены следующие лингвистические высказывания (табл. 1).

Модель нечеткого анализа вариантов внедрения/реализации ЕИСУ реализована в среде BPsim.MSN – визуальном конструкторе фреймовых экспертных систем, основанном на ряде графических нотаций, включающем диаграммы следующих типов:

диаграмму классов, в которой содержится описание концептуальной модели предметной области, включающее данные по проектам, критерии сравнения и сравнительные характеристики, шкалу парных сравнений (Саати), перечень

Таблица 1

Парные сравнения проектов ЕИС по шкале Саати

Критерий	Парные сравнения	
$G_1$	Отсутствие преимущества $x_2$ над $x_5$ Существенное преимущество $x_2$ над $x_3$ Явное преимущество $x_1$ над $x_4$ Абсолютное преимущество $x_1$ над $x_5$	Существенное преимущество $x_3$ над $x_4$ Абсолютное преимущество $x_3$ над $x_5$ Абсолютное преимущество $x_4$ над $x_1$
$G_2$	Явное преимущество $x_3$ над $x_1$ Слабое преимущество $x_3$ над $x_2$ Слабое преимущество $x_3$ над $x_4$ Существенное преимущество $x_3$ над $x_5$ Слабое преимущество $x_2$ над $x_4$ Существенное преимущество $x_2$ над $x_5$	Явное преимущество $x_2$ над $x_1$ Почти существенное преимущество $x_4$ над $x_5$ Явное преимущество $x_4$ над $x_1$ Явное преимущество $x_5$ над $x_1$
$G_3$	Отсутствие преимущества $x_2$ над $x_3$ Существенное преимущество $x_2$ над $x_4$ Явное преимущество $x_2$ над $x_1$ Явное преимущество $x_2$ над $x_5$	Существенное преимущество $x_4$ над $x_5$ Явное преимущество $x_4$ над $x_1$ Почти существенное преимущество $x_5$ над $x_1$
$G_4$	Явное преимущество $x_2$ над $x_3$ Абсолютное преимущество $x_2$ над $x_1$ Абсолютное преимущество $x_2$ над $x_4$ Абсолютное преимущество $x_2$ над $x_5$ Явное преимущество $x_3$ над $x_4$	Абсолютное преимущество $x_3$ над $x_5$ Абсолютное преимущество $x_3$ над $x_1$ Явное преимущество $x_4$ над $x_5$ Абсолютное преимущество $x_4$ над $x_1$ Абсолютное преимущество $x_5$ над $x_1$
$G_5$	Явное преимущество $x_1$ над $x_4$ Абсолютное преимущество $x_1$ над $x_2$	Абсолютное преимущество $x_1$ над $x_3$ Абсолютное преимущество $x_1$ над $x_5$
$G_6$	Отсутствие преимущества $x_2$ над $x_5$ Отсутствие преимущества $x_2$ над $x_4$ Слабое преимущество $x_2$ над $x_1$	Существенное преимущество $x_2$ над $x_3$ Явное преимущество $x_1$ над $x_3$

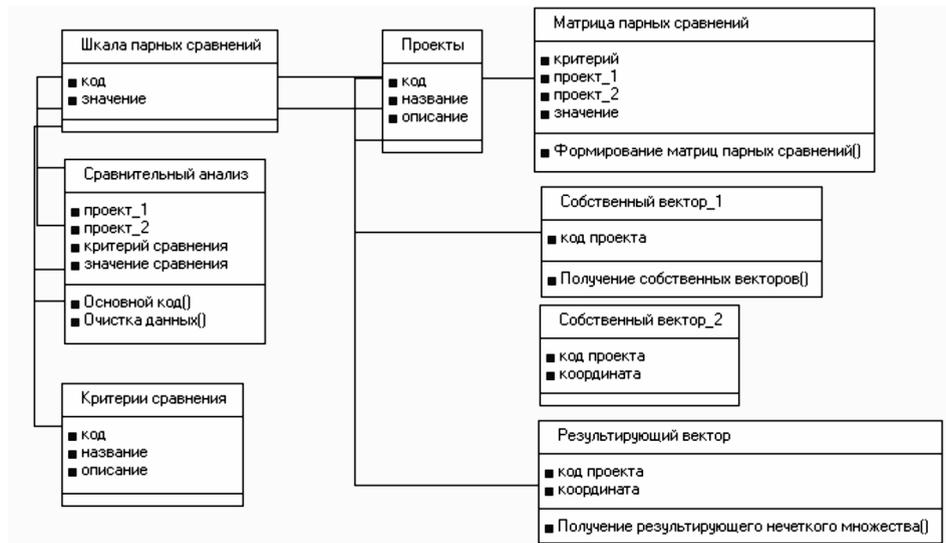


Рис. 4. Диаграмма классов для модели «Анализ и выбор путей реализации ЕИС университета»

вычислительных процедур, входящих в состав алгоритма нечеткого анализа, реализованных на языке T-SQL, а также ряд служебных таблиц, необходимых для хранения промежуточных результатов на различных этапах выполнения нечеткого анализа (рис. 4);

диаграмму потоков данных, которая затем

может быть преобразована в диаграмму прецедентов средствами BPSim.MSN;

диаграмму последовательностей. При помощи данной диаграммы определяется последовательность выполнения процедур, входящих в состав алгоритма нечеткого многокритериального анализа.

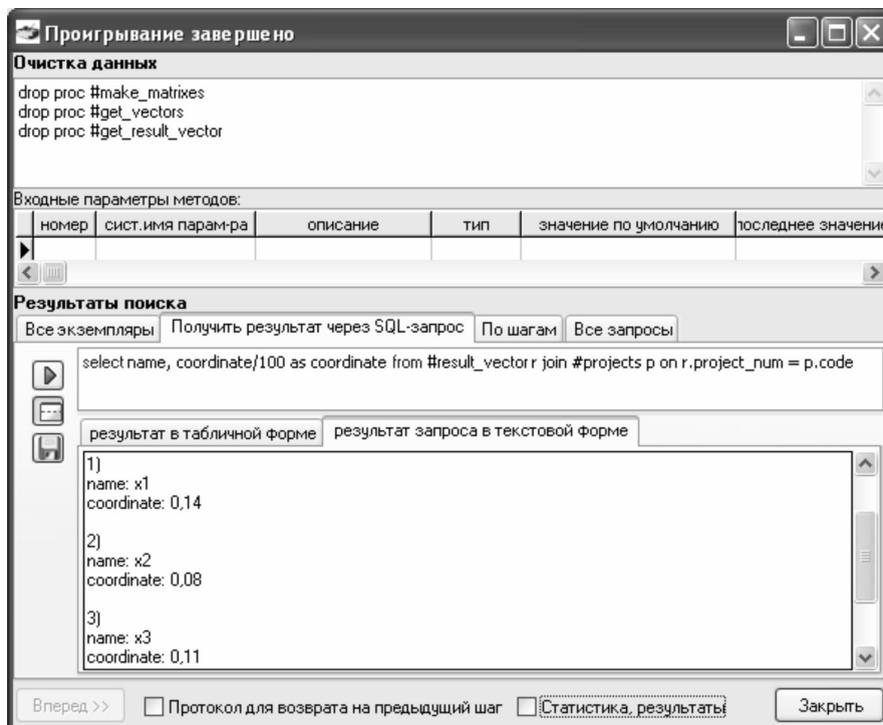


Рис. 5. Вид диалогового окна с результатами проигрывания модели

Таблица 2

Результаты вычисления характеристик проектов

	$x_1$ (Naumen)	$x_2$ (Собственная разработка)	$x_3$ (АНХ)	$x_4$ (IBS)	$x_5$ (RedLab)
Значение степени принадлежности $\mu_{\tilde{D}}(x_i)$	0,14	0,08	0,11	0,13	0,09
Длительность проекта, лет	5	12	8	7	3
Общая стоимость, млн руб.	30	70	45	52	270

Цикл моделирования (подготовка и загрузка исходных данных, выполнение процедур алгоритма нечеткого анализа, получение и вывод результатов) реализуется при помощи модуля поиска решения, который осуществляет пошаговое выполнение диаграммы последовательностей и выводит результаты выполнения в диалоговом окне. Результаты моделирования выгружаются в таблицу «Результирующий вектор» в виде вектора показателей степеней принадлежности  $\mu_{\tilde{D}}(x_i)$ ,  $i = \overline{1,5}$  к результирующему нечеткому множеству  $\tilde{D}(1-2)$ . На рис. 5 представлен вид окна поиска решения после завершения проигрывания модели. Результирующий вектор и характеристики проектов, полученные по результатам ИМ, представлены в табл. 2.

Как следует из представленных в таблице результатов, наиболее эффективным проектом для реализации и внедрения с точки зрения цены и

качества является проект  $x_1$  с наибольшим показателем  $\mu_{\tilde{D}}(x_i)$  – NAUMEN. Немного отстают проекты  $x_3$  и  $x_4$  – АНХ и IBS. Проект RedLab слишком дорог по цене. Проект  $x_2$  «Самостоятельная разработка и внедрение ЕИС» имеет наименьший показатель  $\mu_{\tilde{D}}(x_i)$  из-за отсутствия внедрения и высокой стоимости, по сравнению с остальными проектами.

В данной статье рассмотрены различные технологии применения методов нечеткого моделирования и анализа в составе программного комплекса мультиагентного моделирования VPsim4. Данные методы уже нашли успешное применение при разработке пакета моделей управления инфраструктурой вуза, которые использовались в качестве программных СППР на различных этапах разработки и внедрения единой информационной системы УГТУ–УПИ.

Работа выполнена в рамках госконтракта 02.740.11.0512.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аксенов, К.А.** Разработка и применение объектно-ориентированной системы моделирования и принятия решений для мультиагентных процессов преобразования ресурсов [Текст]/К.А. Аксенов, И.И. Шолкина, Е.М. Сафрыгина//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление.–2009.–№ 3 (80). –С. 87–97.

2. **Деменков, Н.П.** Нечеткое управление в технических системах: Учеб. пособие [Текст]/Н.П. Деменков.–М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.–200 с.

3. **Аксенов, К.А.** Поддержка принятия решений в сфере управления проектами информатизации [Текст]/К.А. Аксенов, Д.М. Колосов, Е.Ф. Смолий//Новые образовательные технологии в вузе: Сб. докл. V Междунар. науч.-метод. конф.–Екатеринбург УГТУ–УПИ, 2008.–Ч.1.–С. 414–420.

4. **Волков, Е.А.** Численные методы: Учеб. пособие для вузов [Текст]/Е.А. Волков.–М.: Наука, 1987.–2-е изд., испр.–248 с.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЫНОЧНОГО МЕХАНИЗМА НА ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРОДУКЦИИ

Современная экономическая действительность характеризуется многочисленными и, как правило, противоположными интересами. Покупатели желают приобретать недорогие товары при большой ответственности продавца. Продавцы, наоборот, хотят продавать товары по высоким ценам при ограниченной ответственности за товары. Работники стремятся иметь высокую зарплату и приятную, интересную работу. Работодатели пытаются обеспечить высокую производительность труда при низкой заработной плате. Кредиторы хотели бы вложить свои деньги под высокие проценты, контролировать их использование и в любой момент времени иметь возможность получить вложенные деньги с достаточной прибылью. Заемщики, наоборот, ищут по возможности дешевые деньги на продолжительный срок и с правом свободного распоряжения ими.

Такого рода противоположные интересы вы-

равниваются в рыночной экономике на товарных рынках, рынках труда и рынках капитала. Так, на товарном рынке каждый хозяйственный субъект составляет для себя собственный хозяйственный план: продавцы составляют планы продаж товаров; покупатели, наоборот, – планы покупок (своего потребления). При этом продавец имеет намерение получить максимальную прибыль, в то время как покупатель стремится максимизировать свою выгоду, например купить по низкой цене товар достаточно высокого качества. Или на рынке капитала кредитор хочет максимизировать свою выгоду (прибыль, жизненно важную для региона продукцию и т. д.), а заемщик – максимизировать свою прибыль [1].

Задача фирмы в условиях современной рыночной экономики состоит в том, чтобы преобразовать требования потребителей на «входе» в готовую продукцию (результат) заданного качества

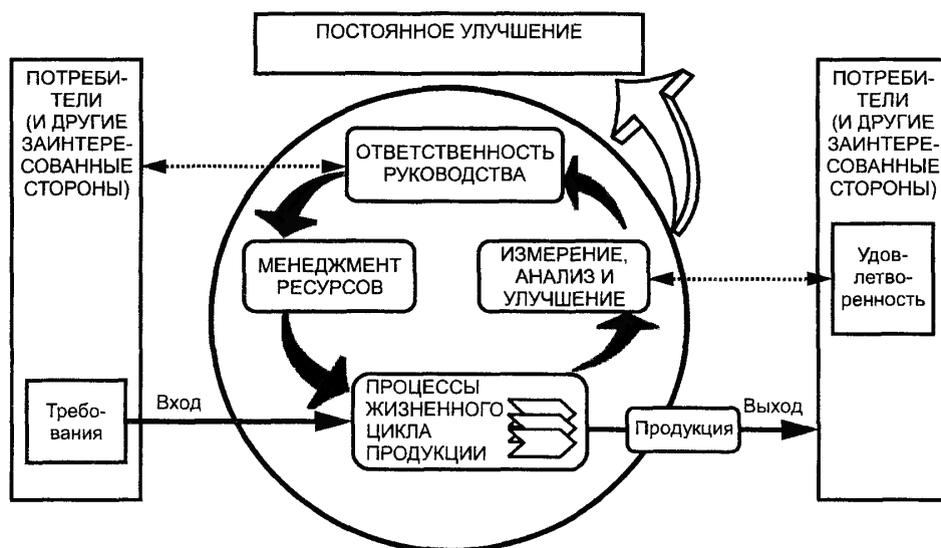


Рис.1. Трансформационный процесс обеспечения качества продукции

на выходе, затратив при этом как можно меньше ресурсов [1].

Между затратами на «входе» (Input) и результатами на «выходе» (Output), а также параллельно им происходят многочисленные действия, «решаются различные частные задачи», которые описывает трансформационный процесс обеспечения качества продукции, представленный на рис. 1 [2].

К важнейшим частным задачам трансформационного процесса обеспечения качества продукции относятся: формирование требований к продукции, разработка продукции, обеспечение производства продукции (менеджмент ресурсов, в т. ч. человеческих), хранение, контроль качества продукции, сбыт, финансирование, совершенствование персонала, измерение, анализ, улучшение и ответственность руководства.

Наиболее важным этапом формирования требований к продукции и основой для получения высокого качества на выходе является стадия разработки. По оценкам современного рынка, 40–50 % затрат на качество приходится на стадию разработки [1]. На данной стадии жизненного цикла необходимо сформулировать и проанализировать требования потребителей и сопоставить их с имеющимися возможностями производственных мощностей. В результате завершения этой стадии необходимо выработать значения технических характеристик будущего продукта и заложить их в опытный образец [1, 2].

Для достижения данной цели необходимо формализовать как сам процесс создания проекта изделия, так и процесс анализа требований к нему, для чего на стадии разработки целесообразным является решение следующих задач [3, 4]:

- достижение качества;
- контроль качества;
- управление качеством продукции.

Последовательность возникновения этих задач представлена в виде схемы, отраженной на рис. 2 [3]. Эта последовательность присуща созданию как сложной, наукоемкой продукции, так и более простых образцов продукции.

Стадия разработки продукции включает несколько важных этапов, на которых формируются требования к продукции и закладываются основы ее качества. К ним следует отнести разработку технического задания (ТЗ), эскизное проектирование (ЭП), техническое предложение (ТП) и технический проект (ТПр). На всех перечисленных этапах происходит решение различных задач в области качества, описанных выше, с применением специфических методов, представленных в таблице [5].

В соответствии с таблицей решение задач качества на стадии разработки начинается с разработки ТЗ. Техническое задание является основным исходным документом при создании новой продукции. ТЗ разрабатывается на основе результатов выполненных научно-исследовательских и экспериментальных работ, научного прогнозирования, анализа передовых достижений отечественной и зарубежной промышленности.

При разработке ТП рассматривается, как правило, ряд вариантов структурных схем конструкции. Анализ выполнимости различных возможных структурных схем может быть проверен на основе использования опыта, с помощью моделирования и функционального анализа, лабораторных экспериментов и испытаний, создания макетов или сочетания указанных методов. Также перспективным на данном этапе является проведение квалиметрического анализа разрабатываемой продукции [3, 5]. В результате анализа выполняется отбор допустимых конструктивных решений, удовлетворяющих требованиям ТЗ по показателям качества.

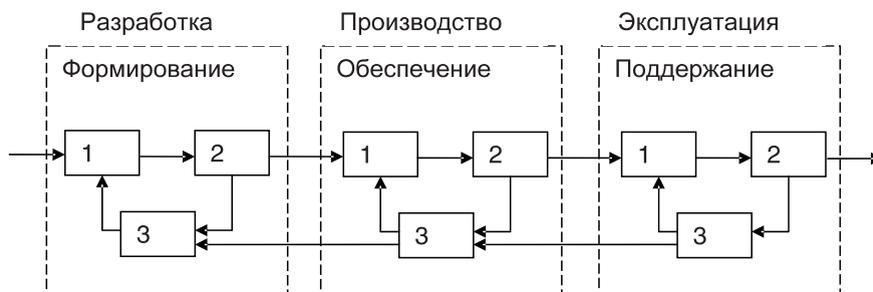


Рис. 2. Универсальная схема создания продукции по стадиям ее жизненного цикла

## Распределение методов формирования качества продукции на стадии разработки

Этапы разработки продукции	Методы формирования качества
Разработка ТЗ	Дифференцирование и интегрирование, научное прогнозирование, выполнение научно-исследовательских и экспериментальных работ
Техническое предложение	Оптимизация, моделирование и функциональный анализ, лабораторные эксперименты и испытания, создание макетов или сочетания указанных методов
Эскизный проект	Интегральное исчисление, оптимизация, инверсия, аналогия, конструктивная преемственность
Технический проект	Функциональный анализ, моделирование, метод экспертных оценок, метод FMEA, структурирование функций качества QFD

На этапе эскизного проекта решаются задачи выбора принципиальных конструктивных решений, дающих общее представление об устройстве и принципе работы образца продукции. На этом этапе выполняется предварительный расчет функциональных параметров и показателей качества разрабатываемой продукции. При разработке эскизного проекта применяют методы инверсии, аналогии, конструктивной преемственности [3, 4]. При этом особо выделяют требования к соблюдению показателей качества, технической эстетике, повышению рентабельности образца.

На этапе ТПр проводится всесторонняя теоретическая и экспериментальная проработка схемных и конструктивных решений разрабатываемого образца продукции. Технический проект должен содержать расчетное подтверждение соответствия отдельных функциональных параметров и показателей качества заданным требованиям.

Окончательное решение принимается в результате применения метода структурирования функций качества QFD (Quality Function Deployment) или метода «дома качества», позволяющего связать технические характеристики продукта с требованиями потребителей и процессом производства [5]. Для дополнительной проверки выполнения требований к надежности продукции применяется анализ видов и последствий потенциальных отказов FMEA – Potential Failure Mode and Effects Analysis, направленный на предотвращение дефектов или снижение негативных последствий от них [5].

Следующее звено процесса обеспечения качества – менеджмент ресурсов, подразумевающий обеспечение материальными ресурсами высокого качества (в т. ч. производственными ресурсами), обеспечение инфраструктуры и производственной среды. Инфраструктура может включать:

здания, рабочее пространство и связанные с ним средства труда;

оборудование для процессов (как технические, так и программные средства);

службы обеспечения (например, транспорт или связь, или информационные системы).

Производственная среда подразумевает условия, в которых выполняется работа, включая физические и окружающие условия и другие факторы (такие, как шум, температура, влажность, освещенность или климатические условия). Перечисленные элементы закладывают основу качества продукции через качество сырья и материалов, качество человеческих ресурсов, а также через обеспечение стабильности производственной среды.

Процессы жизненного цикла продукции, обеспечивающие ее качество, помимо разработки продукции, закупки ресурсов, обслуживания и управления устройствами для мониторинга и измерений и обеспечения инфраструктуры и производственной среды включают этап производства опытного образца продукции, а затем и опытной серии. Все перечисленные процессы жизненного цикла продукции должны планироваться, отслеживаться (идентифицироваться), проверяться и совершенствоваться, т. к. именно они формируют качество продукции.

Следующее звено – измерение, анализ и улучшение – подразумевает постоянный мониторинг требований потребителей, мониторинг и измерение продукции и процессов, проведение внутренних аудитов и корректирующих и предупреждающих действий по ним [1, 2].

Мониторинг и измерение продукции на различных этапах процесса производства связаны с выполнением отдельных видов работ, таких, как

- контроль технического состояния и точности оборудования;
- контроль технологической оснастки;
- контроль агрегатов;
- исследование надежности выпускаемой продукции;
- контроль качества упаковки и хранения продукции на складах;
- контроль качества изделий в процессе эксплуатации их потребителем и по завершении отдельных этапов эксплуатации;
- контроль измерительной техники;
- контроль линейных и угловых измерений;
- контроль особо точных измерений;
- контроль дефектоскопии;
- контроль изоляции брака;
- контроль качества продукции, предназначенной для поставки на экспорт;
- проведение инспекционного контроля;
- техническое и технологическое обеспечение процессов контроля качества;
- учет, анализ и классификация брака в производстве;
- анализ претензий и рекламаций потребителей на выпускаемую продукцию;
- внедрение новых средств и методов технического контроля (неразрушающего, активного и др.);
- ремонт контрольно-испытательного оборудования, измерительных приборов и оснастки;
- разработка, внедрение и контроль функционирования системы управления качеством продукции на предприятии.

Таким образом, существуют частные задачи трансформационного процесса обеспечения качества продукции, которые могут рассматриваться как «стоимостная цепочка», которая связывает между собой звенья (поставщики и потребители), расположенные до и после непосредственно процесса изготовления продукции, что представляет собой систему взаимосвязанных задач фирмы [1, 2, 5]. Однако некоторые ученые [1, 12, 15] так-

же отмечают, что для поддержания функционирования трансформационного процесса обеспечения качества продукции необходимо создать эффективную и гибкую структуру производственной фирмы. Основной производственной единицей фирмы является цех. Цех выполняет определенную часть производственного процесса, осуществляет свою производственную деятельность на началах внутрипроизводственного хозяйственного расчета. Цеха обычно состоят из участков, число которых зависит от объемов и специализации производства, сложности выполняемой работы, состава и количества оборудования, численности рабочих и т. д.

Состав основных и вспомогательных цехов и обслуживающих хозяйств производственного назначения, а также формы их кооперационных связей являются производственной структурой фирмы. В соответствии с этим состав участков и формы их кооперирования образуют производственную структуру цеха. И, наконец, состав рабочих мест участка и формы их производственных связей образуют производственную структуру участка [1].

Производственная структура фирмы определяется следующими важнейшими факторами: видом и объемом выпускаемой продукции, а также ее трудоемкостью, конструктивно-технологической однородностью выпускаемой продукции, формами специализации и уровнем межфирменной кооперации, формами организации коллективного труда и др.

Вид продукции и ее конструктивно-технологическая однородность влияют на технологию ее изготовления, на конкретный состав и число цехов и участков, на уровень и формы их специализации, на трудоемкость продукции. Чем однороднее продукция, тем однороднее используемая технология, тем вероятнее более узкая специализация цехов и участков и, следовательно, шире возможности кооперирования не только внутри фирмы, но и вне ее, тем меньше трудоемкость продукции.

Объем выпуска и трудоемкость продукции влияют на размеры цехов и участков, на их число и специализацию. Чем больше объем выпуска и трудоемкость продукции, тем крупнее могут быть цеха и участки фирмы, тем выше уровень их специализации.

Формы специализации и уровень межфирменной кооперации определяют в существенной мере

сложность производственной структуры фирмы. Чем выше уровень специализации и кооперирования производства, тем ограниченнее номенклатура изготавливаемой продукции, однороднее технология производства и проще производственная структура фирмы.

Производственная структура фирмы определяется при проектировании, она не может быть неизменной. Она изменяется в связи с изменением номенклатуры и объема выпускаемой продукции, развитием специализации и кооперирования производства, совершенствованием техники, технологии и организации производства. Производственная структура фирмы должна обеспечить рациональное сочетание во времени и пространстве всех звеньев производственного процесса. При создании фирмы формирование ее производственной структуры осуществляется либо одновременно, либо после определения местоположения фирмы и представляет собой большую и сложную проектную работу. Сложность с точки зрения моделирования производственных процессов выражается прежде всего в том, что фирма обычно создается как многономенклатурная производственная структура, связанная с другими субъектами товарного рынка, как правило, через значительную общность выпускаемой продукции. Спрос на продукцию фирмы является, как правило, случайной величиной и изменяется во времени. Поддерживать уровень высокого спроса на продукцию можно за счет повышения ее конкурентоспособности [1]. В соответствии с законами рынка [1], чем выше конкурентоспособность продукции, т. е. чем она привлекательнее и предпочтительнее для потребителя, тем выше объем продаж и объем производства, что способствует снижению производственных затрат и цен. Этот фактор, в свою очередь, создает дополнительные предпосылки для повышения конкурентоспособности продукции.

Конкурентоспособность предприятия можно рассматривать как уровень эффективности использования производственной фирмой экономических ресурсов относительно их использования конкурентами [9]. В условиях рыночной экономики указанная эффективность выражается через рентабельность продукции, определяемой отношением прибыли к необходимым для ее получения затратам. Существуют три основных фактора обеспечения и повышения конкурентоспособности продукции [1, 8]:

инновационный, заключающийся в повышении уровня потребительских свойств продукции и ее усовершенствования с целью снижения эксплуатационных расходов, совершенствовании производства с целью повышения качества продукции и снижения ее себестоимости;

ценовой, состоящий в снижении цен на продукцию, создающий ее ценовой потенциал по сравнению с конкурирующей продукцией;

развитие базы послепродажных услуг (сервиса), включающих обеспечение потребителей запасными частями и расходными материалами, проведение технического обслуживания и ремонта для поддержания и восстановления работоспособности продукции в период ее эксплуатации [7, 8].

Стоит отметить, что повышение качества продукции сопровождается возрастанием затрат на ее создание (разработку и производство). Для сокращения этих затрат необходимо использование достижений научно-технического прогресса, повышение уровня организации производства, производительности труда, которые ведут к снижению общественно необходимых затрат на единицу полезного эффекта продукции. Моральное старение продукции также ведет к относительному падению ее качества, хотя стоимость продукции может оставаться неизменной. Поэтому стоимость, а тем более устанавливаемая рыночными механизмами цена продукции, не могут служить основным критерием качества продукции.

При этом важно учитывать, что общественно необходимыми затратами, формирующими цену продукции, корректируемую рыночной ситуацией, могут считаться лишь затраты, осуществляемые в пределах удовлетворения определенной общественной потребности, оцениваемой маркетинговыми исследованиями с учетом конкурентоспособности продукции и насыщенности ею рынка. Однако помимо этих затрат существуют затраты на контроль качества продукции, составляющие порядка 10 % от ее стоимости. Поэтому производитель заинтересован нести только те затраты, которые впоследствии приведут к увеличению удовлетворенности потребителя, и, следовательно, к росту продаж, и пытается уменьшить другие виды затрат.

Обеспечить конкурентоспособность продукции, сократив затраты на контроль ее качества, возможно за счет создания гибкой системы контроля качества на предприятии. Гибкие (адап-

тивные) структуры нашли широкое применение в науке, технике, на производстве. Смысл их заключается в достаточно быстрой перестройке при изменении как внешних, так и внутренних условий. При этом речь идет о придании данному процессу алгоритмического и по возможности непрерывного характера при непременном выполнении принципа Р. Эшби: «Чтобы успешно противостоять среде, сложность решения и быстрота его принятия должны соответствовать сложности и скорости изменений в среде» [7]. Из известных организационных инструментов для этой цели наиболее подходят матричные организационные структуры, системы реинжиниринга и современные информационные технологии в области контроля качества продукции [8].

В аналогичном ракурсе можно рассматривать противоречие между стабильностью (устойчивостью) и изменчивостью (управляемостью). Стабильность свидетельствует о гармонии производственно-сбытовых отношений внутри фирмы, однако она не гарантирует постоянного успеха, т. к. непрерывно происходят периодические, а подчас – внезапные изменения условий функционирования фирмы. При этом свойство изменчивости требует таких механизмов, методов и моделей, которые не адекватны стабильной структуре процессов принятия управленческих решений. В то же время без обеспечения какой-либо устойчивости в деятельности фирмы нельзя достигнуть желаемой, а точнее – необходимой изменчивости, т. е. наилучшего приспособления к рыночной среде [1, 8, 9].

Итак, воздействия современного рынка в лице спроса потребителей непосредственно влияют на конкурентоспособность продукции. Падение спроса потребителей заставляет производствен-

ную фирму сокращать те затраты, которые напрямую не увеличивают спрос на продукцию. К таким затратам относятся и затраты на контроль качества продукции, которые по некоторым оценкам составляют 10 % от себестоимости [1].

Для сокращения объемов экономических затрат на обеспечение качества продукции, перспективно приведение стационарной системы контроля качества к гибкой системе. Однако для гарантии высокой надежности продукции в обязательном порядке требуется обеспечение устойчивости динамической производственной системы. Устойчивость достигается в процессе управления с учетом не только текущей ситуации, но и тенденций к ее изменению, включая, например, динамику спроса на товары, производимые фирмой.

Задача управления гибкой производственной фирмой – моделировать складывающуюся ситуацию и прогнозировать возможные пути ее развития. В противном случае управление не будет адекватно поставленным целям, будет постоянно опаздывать и не обеспечит эффективного функционирования фирмы. Для достижения данной цели необходим постоянный мониторинг требований потребителя к продукции, а также анализ влияния рыночных факторов на повышение конкурентоспособности продукции. По результатам проведенного анализа должны быть выявлены пути повышения конкурентоспособности продукции. Среди них может быть построение автоматизированной системы контроля качества продукции. Внедрение такой системы позволит сократить долю ручного труда, следовательно сократит длительность жизненного цикла продукции за счет проведения части операций на математических моделях, что приведет к уменьшению экономического фактора обеспечения качества продукции, а значит, и к повышению ее конкурентоспособности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузин, Б.И.** Методы и модели управления фирмой [Текст]/Б.И. Кузин, В.Н. Юрьев, Г.М. Шахдинаров.–СПб: Питер, 2001.–432 с.
2. ИСО 9001:2008 [Текст]/Международный стандарт. Система менеджмента качества. Требования.
3. **Диденко, В.В.** Опыт и перспективы автоматизации испытаний, контроля и поверки продукции приборостроительного предприятия [Текст]/В.В. Диденко, С.С. Дорожко, Б.Е. Курцман.–Л.: ЛДНТП, 1989.–98 с.
4. **Подсевадов, Б.В.** Квалиметрические методы

контроля [Текст]/Б.В. Подсевадов, Ю.В. Рейнов.–Л.: ЛДНТП, 1990.–123 с.

5. **Ребрин, Ю.И.** Управление качеством [Текст]/Ю.И. Ребрин.–Таганрог: ТРТУ, 2004.–52 с.

6. **Мексон, М.Х.** Основы менеджмента [Текст]/М.Х. Мексон, М. Альберт, Ф. Хедоури; Пер. с англ.–М.: Дело, 1992.–702 с.

7. **Саридис, Дж.** Самоорганизующиеся стохастические системы управления [Текст]/Дж. Саридис; Пер. с англ.–М.: Наука, 1980.–400 с.

8. **Ойхман, Е.Г.** Реинжиниринг бизнеса: реинжи-



ниринг организации и информационные технологии [Текст]/Е.Г. Ойхман, Э.В. Попов.–М.: Финансы и статистика, 1997.–336 с.

9. **Федюкин, В.К.** Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции [Текст]/В.К. Федюкин.–М.: КноРус, 2009.–320 с.

УДК 778.5

*Е.И. Нестерова*

## **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫХОДНЫХ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Задачи управления кинематографическими системами включают:

формирование требований к различным видам аудиовизуальной техники по выходным квалиметрическим характеристикам при эксплуатации и техническом обслуживании этой техники;

оценку технического состояния мультимедийной техники и услуг по киноvideообслуживанию зрителей в соответствии с установленными ранее требованиями, т. е. оценку соответствия реальных значений параметров сформулированным функциональным моделям, учитывающим важность тех или иных функций, характеристик;

сравнительный квалиметрический анализ моделей киноvideотехники, разработку методов классификации, ранжирования, присвоения градаций, категорий, методов сертификации;

рациональный выбор совокупности выходных характеристик киноvideотехники и услуг по кинопоказу.

Формально эти задачи могут быть отнесены к области технического регулирования и решены с использованием методов стандартизации и сертификации, но смысловое содержание технического регулирования требует также включения в это направление вопросов метрологии и квалиметрии.

Метрологические процедуры, целью которых является обеспечение единства измерений и получение достоверных результатов, позволяют определить степень соответствия реальных значений параметров, характеристик количественным значениям, приведенным в нормативно-технических документах. Однако особенность кинематографических систем состоит в том, что хотя выходные квалиметрические характеристики киноvideотехники и услуг по кинопоказу могут быть оценены объективными и субъектив-

ными методами, объективные (приборные) методы измерения и контроля могут быть применены только для технических параметров.

На основе анализа результатов, полученных при квалиметрических экспертизах, можно сделать такие же выводы для характеристик, которые могут быть оценены только субъективно, т. е. экспертные методы используются как альтернатива объективным приборным методам оценивания параметров. Такая возможность особенно важна для оценки большого числа частных параметров киноvideотехники, процессов и услуг в кинематографии, для оценки выходных параметров мультимедийной аппаратуры различного функционального назначения.

В то же время квалиметрические экспертизы, как правило, в любом случае являются звеном, следующим за объективными измерениями, т. к. их использование позволяет сделать вывод о полученных в ходе измерений результатах. Для оценивания обобщенных и интегральных квалиметрических характеристик, являющихся результатом воздействия совокупного влияния частных параметров, экспертные субъективные методы оценивания не имеют альтернативы.

Вопросы формирования функциональных требований к киноvideотехнике и различным мультимедийным услугам (т. е. составление перечней выходных квалиметрических характеристик различных видов аудиовизуальной техники и услуг по киноvideообслуживанию зрителей, определение количественных величин этих характеристик, весовости характеристик, возможность обменных соотношений между характеристиками) могут быть решены только методами экспертной квалиметрии.

Степень достоверности и объективности полученных результатов повышается в том случае, когда проводимые исследования позволяют сформулировать системный многофакторный перечень функциональных требований, в который должны входить качественные характеристики изображения и звука, конструктивно-технологические требования к аудиовизуальным средствам, возможности расширения предоставляемых ими функций, удобство эксплуатации, параметрическая надежность, эксплуатационная технологичность. Такой анализ служит начальным этапом для решения вопросов разработки методик рационального выбора, сравнительных оценок, методик классификации, ранжирования, присвоения градаций, категорий.

Формирование некоторой обобщенной структуры квалиметрических характеристик, определяющих качество кинематографической системы, очевидно, нецелесообразно ввиду большого числа вариантов сочетаний параметров и характеристик для различных видов, моделей технических средств, используемых в таких процессах кинематографической системы, как кинопроизводство, кинопрокат и кинопоказ. Однако поскольку именно процесс кинопоказа является заключительным, определяет выходные качественные характеристики кинематографической системы в целом, этот процесс обладает практически всеми квалиметрическими параметрами, которые в той или иной степени характеризуют все предшествующие этапы и элементы, входящие в кинематографическую систему.

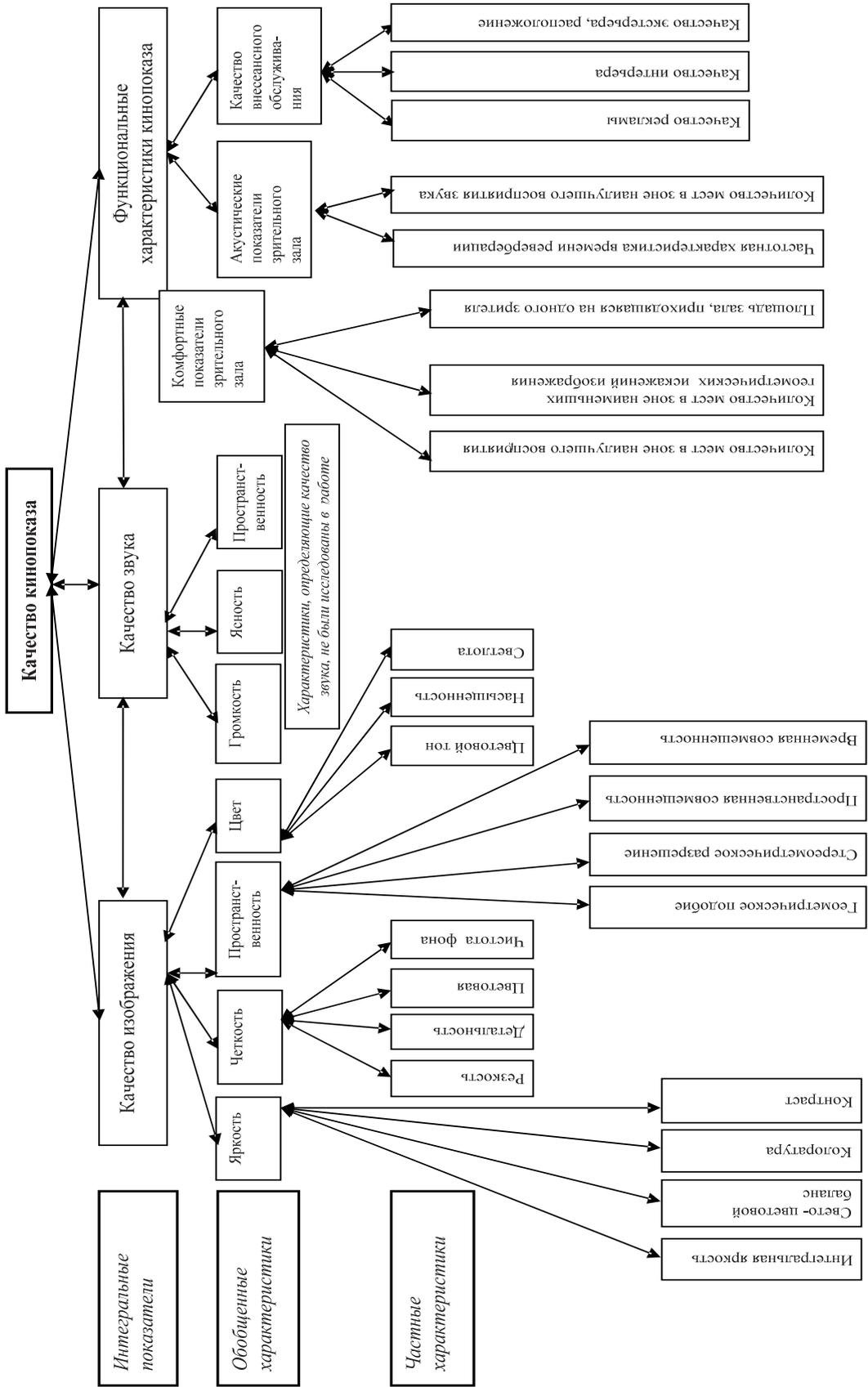
Обобщенная иерархическая структура квалиметрических характеристик, определяющих качество кинопоказа, приведена на рисунке. Структура характеристик имеет иерархическое строение, включает три уровня: частные, обобщенные и интегральные характеристики. Интегральные критерии, определяющие качество кинопоказа, позволяют оценивать качество изображения, звука и совокупность функциональных характеристик кинопоказа.

Для оценивания характеристик, определяющих качество изображения и звука, целесообразно использовать психофизические (сенсорные) квалиметрические экспертные методы, а в основе оценивания функциональных характеристик лежат функциональные (интеллектуальные, логические) квалиметрические экспертизы.

Классификация субъективных характеристик,

определяющих качество изображения и звука, была сформулирована в [1]. Обобщенными характеристиками, определяющими интегральное качество изображения в соответствии с приведенной классификацией, являются яркость, четкость, пространственность, однако современные требования к киноvideотехнике и услугам по кинопоказу, очевидно, требуют включения в интегральный критерий, определяющий качество изображения, и цветовых характеристик.

Сложность включения цветовых характеристик в интегральный критерий заключается в том, что хотя для измерения частных цветовых характеристик разработаны достаточно точные приборные методы, существует слишком большое количество влияющих факторов и психофизиологических эффектов, не позволяющих на основе результатов приборных измерений установить однозначное соответствие между полученными результатами и субъективным восприятием цветовых характеристик изображения [2]. Среди факторов, влияющих на субъективное восприятие цвета, которые должны учитываться при проведении субъективной квалиметрической экспертизы по оценке цветовых характеристик, следует назвать: зависимость субъективного восприятия цвета от уровня освещенности (при большей освещенности сигналы цветоразличения становятся сильнее, повышается разнообразие и яркость окраски); влияние величины цветового поля на восприятие цвета (при малом угловом поле – менее 20' – восприятие синего цвета исчезает); влияние яркости фона на воспринимаемый цвет (черный фон усиливает яркость цветных полей, но снижает насыщенность); при просмотре телевизионных передач при свете расширяется гамма цветовосприятия; влияние цвета окружающего фона (этот эффект известен, как «одновременный цветовой контраст»); цвет фона может быть одинаковым, но при наложении на него черного узора он воспринимается темнее, а при наложении белого узора – светлее (эффект расширения Бецольда); при рассматривании красно-синих изображений на некотором расстоянии эти изображения воспринимаются фиолетовыми (красный свет фокусируется на сетчатке или близко к ней, а синий – на значительном расстоянии перед ней, в итоге на сетчатке образуется большое расплывчатое синее изображение, которое накладывается на красное изображение, что приводит к восприятию фиолетового цвета); эф-



Иерархическая структура качественных характеристик, определяющих качество кинопоказа

фекты восприятия цвета, возникающие из-за текстуры (различий в цвете и яркости, по которым распознается природа поверхности) и блескости (например, металлический блеск, по которому можно различить медную, латунную, золотую, серебряную, хромированную поверхности); влияние насыщенности цвета на его яркость (эффект Гельмгольца–Кольрауша) – некоторые цвета (в большей степени красные, чем желтые) кажутся ярче при большей насыщенности; влияние изменения яркости на восприятие цветового тона (при большей яркости красный цвет кажется желтее, а фиолетовый и сине-зеленый – синее и др.)

Хотя перечисленные выше эффекты представляют, в первую очередь, предмет исследования психофизики, их необходимо учитывать при организации корректных субъективных психофизических квалиметрических экспертиз по оценке цветовых характеристик изображения.

Обобщенными характеристиками, определяющими интегральное качество звука при кинопоказе, являются громкость, ясность и пространственность. Поскольку, характеристики, определяющие качество звука, не входили в область данного исследования, детальная классификация частных характеристик, определяющих обобщенные, в настоящей статье не приведена.

Психофизические квалиметрические экспертизы предполагают моделирование характеристик изображения и оценку заметности вносимых изменений. Для проведения экспертиз необходимо соответствующее информационное, программное и приборное обеспечение.

Классификация обобщенных и частных функциональных характеристик, определяющих качество кинопоказа, соответствует классификации, приведенной в отраслевых стандартах [3–7]. Обобщенные характеристики включают совокупность частных технологических, акустических и комфортных показателей, позволяющих дать квалиметрическую оценку зрительному залу; совокупность частных характеристик, определяющих качество внесанного обслуживания.

Несмотря на кажущуюся простоту и конкретность функциональных квалиметрических методов, функциональная квалиметрия – одна из наиболее динамичных областей. Причинами актуальности широкого использования и разработки функциональных квалиметрических методик являются внедрение все новых технических, мультимедийных средств, технологий, функцио-

нальные возможности которых необходимо анализировать, а также появление новых возможностей, предоставляемых информационными технологиями и программными средствами для проведения необходимого квалиметрического анализа.

Поскольку данные нормативно-технические документы в кинематографии в настоящее время носят лишь информационно-рекомендательный характер, в зависимости от характера решаемой практической квалиметрической задачи приведенная классификация квалиметрических характеристик может быть переработана, в первую очередь, с учетом требований зрителя и современных функциональных возможностей технологической элементной структуры кинематографической системы [8–14].

Иерархический характер приведенной обобщенной структуры квалиметрических характеристик, определяющих квалиметрический уровень кинематографической системы позволяет осуществлять квалиметрическую оценку на различных уровнях.

При этом в основу агрегирования зависимых или независимых частных – ( $\Delta q_{ij}, j = 1, \dots, m$ ), обобщенных – ( $\Delta q_{ij}, i = 1, \dots, n$ ) и интегральных  $Q_l, l = 1, \dots, k$  квалиметрических неотрицательных характеристик и показателей предлагается положить следующие утверждения–теоремы.

1. Суммарный эффект кинопоказа, оцениваемый по любой из обобщенных квалиметрических характеристик  $\Delta q_{ij}, i = 1, \dots, n$ , определяется значением модуля характеристической функции суммы любых вещественно значных физически реализуемых случайных весовых функций квалиметрических частных характеристик  $\Delta q_{ij}, j = 1, \dots, m$ , характеристик нижнего уровня иерархически упорядоченной их структуры.

2. Суммарный эффект кинопоказа, оцениваемый по любой интегральному квалиметрическому показателю  $\Delta Q_l, l = 1, \dots, k$ , определяется значением модуля характеристической функции суммы любых вещественно значных физически реализуемых случайных весовых функций квалиметрических характеристик  $\Delta q_{ij}, i = 1, \dots, n$ , непосредственно связанных иерархическим упорядочением с существующим интегральным показателем.

3. Показатель качества кинозала  $Q$  в целом оценивается значением модуля характеристической функции суммы любых вещественно знач-

ных физически реализуемых случайных – весовых функций интегральных квалиметрических показателей  $\Delta Q_l, l = 1, \dots, k$ , непосредственно определяющих в соответствии с иерархическим упорядочением эффективности социальной кинематографической системы.

В качестве случайных – весовых функций принимаются линейные функции  $\varphi(\Delta q) = k\Delta q$ , где  $\Delta q = \Delta q_{ij}, \Delta q_i, Q_i$  – отклонения частных, обобщенных характеристик и интегральных показателей от эталонных значений, измеренные в нормированной относительной шкале, и  $k = k_{q_{ij}}, k_{q_i}, k_{Q_i}$  – случайные весовые коэффициенты частных, обобщенных характеристик и интегральных показателей с известными законами распределения вероятностей, устанавливаемыми в процессе единой квалиметрической экспертизы кинематографической системы.

Отметим, что в построенные агрегированные квалиметрические характеристики и показатели могут входить параметры. Это параметры «взвешивающих» функций квалиметрических характеристик, составляющих обобщенную характеристику, или параметры «взвешивающих» функций интегральных показателей, составляющих показатель качества кинематографической системы в целом. Соответствующие параметры определяются в процессе проведения единой квалиметрической экспертизы.

*Доказательство* основывается на идее представления линейной комбинацией совокупности функций любых зависимых или независимых квалиметрических взвешенных частных ( $k_{q_{ij}} \Delta q_{ij}, j = 1, \dots, m$ ), взвешенных обобщенных характеристик ( $k_{q_i} \Delta q_i, i = 1, \dots, n$ ), взвешенных интегральных показателей ( $k_{Q_l} \Delta Q_l, l = 1, \dots, k$ ) как случайных величин, подчиненных произвольным законам распределения вероятностей с существующими моментами.

Линейной комбинации однозначно соответствует скалярная комплексная функция в частной области – характеристическая функция одномер-

ной случайной величины, представляющейся либо обобщенной квалиметрической характеристикой  $\Delta q_i, i = 1, \dots, n$ , либо интегральным показателем  $\Delta Q_l, l = 1, \dots, k$ , либо показателем социального эффекта  $Q$  кинематографической системы в целом.

Так, при описании случайных величин  $\varphi(\Delta q) = k\Delta q$  как линейных функций квалиметрических частных, обобщенных и интегральных характеристик, нормальными распределениями, характеристические функции квалиметрического показателя системы, интегральных показателей и обобщенных характеристик записываются в виде следующих выражений:

$$\begin{aligned} \varphi(\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_l) &= \\ = e^{j \sum_{l=1}^l \bar{k}_l \Delta Q_l - \frac{1}{2} \sum_{l=1}^l \Delta Q_l \Delta Q_{l+1} \sigma_l \sigma_{l+1} \gamma_{l,l+1}} &; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_l(\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n) &= \\ = e^{j \sum_{i=1}^n \bar{k}_i \Delta q_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta q_i \Delta q_{i+1} \sigma_{i,i+1} \gamma_{i,i+1}} &; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_i(\Delta q_{i,1}, \Delta q_{i,2}, \dots, \Delta q_{i,m}) &= \\ = e^{j \sum_{j=1}^m \bar{k}_{ij} \Delta q_{ij} - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m q_{ij} \Delta q_{i,j+1} \sigma_{ij} \Delta \sigma_{i,j+1} \gamma_{i,j+1}} &. \end{aligned}$$

Для решения практических квалиметрических задач представляют интерес статистические интегральные, обобщенные критерии, сформированные на основе модуля соответствующей характеристической функции и ее действительной части. При этом вещественная часть возводится в квадрат для того, чтобы расчетный интегральный критерий принимал только положительные значения.

Из этих выражений непосредственно следует возможность количественного исследования влияния каждой из частных квалиметрических характеристик на соответствующую обобщенную характеристику, каждой обобщенной характеристики – на соответствующий интегральный показатель и каждого интегрального показателя – на качество кинематографической системы в целом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коломенский, Н.Н. О классификации психометрических технологических параметров аудио- и видеосистем [Текст]/Н.Н. Коломенский//Сб. науч. тр. –СПб.: СПИКиТ, 1998.–Вып.9.
2. Нестерова, Е.И. Квалиметрия и техническое регулирование в кинематографии [Текст]/Е.И. Нестерова.–СПб.: Политехника, 2010.–183 с.

3. ОСТ 19-238-00 [Текст]/Кинотеатры и видеозалы. Категории. Технические требования. Методы контроля и оценки.
4. ОСТ 19-157-94 [Текст]/Кинотеатры. Качество звуковоспроизведения.
5. ОСТ 19-154-00 [Текст]/Кинотеатры и киноустановки. Технологические параметры зрительных залов.

6. ОСТ [Текст]/19-155-00 Кинотеатры и киноустановки. Качество изображения. Технические требования.
7. ВСН 45-86 [Текст]/Культурно-зрелищные учреждения. Нормы проектирования.
8. SMPTE 202M [Текст]/Характеристики В-цепей кинозалов.
9. SMPTE 196M [Текст]/Освещение экрана и условия просмотра.
10. SMPTE EG-18 [Текст]/Дизайн эффективных кинотеатров.
11. SMPTE EG-5 [Текст]/Качество проецируемого изображения.
12. SMPTE PR-98 [Текст]/Измерение освещенности экрана.
13. SMPTE PR-141 [Текст]/Уровни акустических шумов в кинозалах.
14. **Нестерова, Е.И.** Методология экспертной квалиметрии и сертификации систем качества в кинематографии [Текст]/Е.И. Нестерова.—СПб.: Политехника, 2005.—248 С.

УДК 005.60.654

*О.К. Кузнецова, М.В. Мейер, А.И. Осадчий*

## **МЕТОДИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИКОЙ ПРЕДПРИЯТИЯ СВЯЗИ**

Для предприятия связи, как и для любой коммерческой структуры, основная цель деятельности – удовлетворение потребностей экономики и общества в услугах, получение прибыли и обеспечение своей финансовой устойчивости.

Экономика современных предприятий связи испытывает влияние многих факторов внутренней и внешней среды, таких, как быстрая смена ситуации на рынке, прогресс техники и технологии связи, организационные изменения, влияние регулятора и др.

При этом управление предприятием связи становится неэффективным при принятии несвоевременных и необоснованных решений. С целью повышения эффективности функционирования предприятия связи должны постоянно проводить работы по оптимизации человеческих, технических, информационных, технологических и финансовых ресурсов экономики предприятия.

На каждом этапе такой работы предприятие принимает соответствующее ситуации управленческое решение. Однако в силу постоянного изменения внутренних и внешних факторов любое неправильное или несвоевременное управленческое решение, принятое без анализа состояния перечисленных выше составляющих ресурсов экономики предприятия, может иметь негативные последствия.

Неправильные или несвоевременные управленческие решения приводят к появлению убытков, упущенных выгод, замедлению темпов развития и другим отрицательным эффектам.

Во избежание таких ситуаций предприятиям связи необходимо базировать практику принятия управленческих решений на результатах научных исследований. Предприятие связи имеет возможность совершенствовать управленческую деятельность, применяя современные методические инструменты: рекомендации, методики, инструкции и другую научную продукцию, с учетом актуальной информации о внешних и внутренних факторах функционирования предприятия.

Являясь одним из ведущих центров научных исследований в области связи, Санкт-Петербургский филиал Центрального НИИ связи (ЛО ЦНИИС) на протяжении последних лет ведет разработку методических инструментов, способствующих принятию эффективных управленческих решений.

В настоящее время научно-исследовательские разработки ведутся по основным направлениям управления экономикой предприятия и могут быть рекомендованы для применения как в качестве отдельных методических разработок, так и в комплексе сложившейся методической базы управления экономикой предприятия связи (см. рис.).

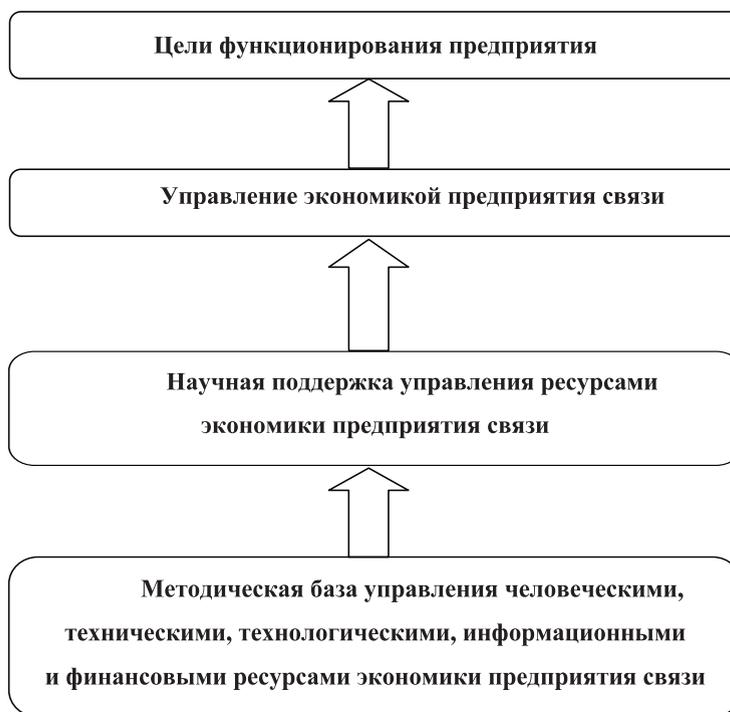


Схема применения методической базы управления экономикой предприятия связи

Разработки ЛО ЦНИИС, составляющие методическую базу управления экономикой предприятия связи, ведутся по следующим направлениям:

- цены и тарифы;
- взаимодействие и взаиморасчеты;
- управление качеством услуг;
- управление численностью персонала;
- оценка эффективности инвестиций;
- маркетинг услуг связи;
- разработка бизнес-процессов, реинжиниринг бизнес-процессов.

Перечисленные разработки обеспечивают научную поддержку управленческих решений практически во всех сферах деятельности предприятия, где большая вариабельность внутренних и внешних факторов создает неопределенность в управлении производством и продажами услуг связи.

Далее рассматриваются основные направления разработки научной продукции ЛО ЦНИИС, предлагаемой для предприятий связи.

**Цены и тарифы.** Методические разработки в этой области направлены на решение следующих задач предприятия связи:

- компенсацию затрат на предоставление услуг;

- обеспечение прибыли, необходимой для развития услуг;

- максимизацию доходов предприятия связи;
- обеспечение конкурентных преимуществ на рынке услуг связи.

Результаты разработок позволяют произвести расчет экономически обоснованных тарифов на продукцию предприятий связи с учетом требований эффективной работы предприятия связи: окупаемости капитальных вложений на создание и развитие новых услуг связи и обеспечение необходимого уровня рентабельности. Цели расчета цен и тарифов на услуги связи включают также конкурентоспособность и привлекательность для потребителей на рынке, где действуют предложения услуг, схожих по потребительским свойствам.

**Взаимодействие и взаиморасчеты.** Актуальность настоящей методической разработки связана с необходимостью компенсации затрат на организацию взаимодействия операторов электросвязи, а также с необходимостью организации прозрачных и справедливых отношений с другими предприятиями связи (операторами услуг связи). Неопределенность в отношениях предприятий возникает, как правило, на стадии

организации взаимодействия, при заключении договоров об оплате организации точек присоединения и согласовании тарифов на услуги по пропуску трафика. При этом остаются актуальными всё те же требования прибыльности и максимизации доходов, которые предъявляются к этим платежам.

Применение методических разработок этой тематики дает возможность обосновать затраты на разработку технических условий на организацию точек присоединения, на разработку проектно-сметной документации, а также на затраты по реализации технических условий. С помощью разработанных рекомендаций предприятия получают возможность прийти к обоюдному согласию в вопросах определения зон ответственности на основе прав собственности на различные элементы сети и сетевое оборудование в зависимости от вариантов финансового участия в технических этапах взаимодействия.

Разработанные в ЛО ЦНИИС методические рекомендации по взаимодействию и взаиморасчетам также дают возможность обосновать затраты предприятий связи на обеспечение качества услуг и пропуска трафика.

Помимо методических рекомендаций, ЛО ЦНИИС предлагает предприятиям связи свои инженерные разработки, такие, как автоматизированная система расчетов (АСР) ТАРЛОН. Используя АСР ТАРЛОН, предприятие имеет в своем распоряжении широкий спектр аналитических и статистических данных об интенсивности использования услуг и ресурсов.

Таким образом, комплексное использование методических рекомендаций и АСР дает возможность операторам связи решать вопросы измерения трафика и расчета тарифов за его пропуск обоснованно и с высокой точностью результатов измерений.

Методики ЛО ЦНИИС позволяют решать такие вопросы, как обоснование взаиморасчетов предприятий за предоставление технических средств и сетевых услуг с учетом организационных и технологических особенностей взаимоотношений. С помощью методических разработок предприятия выбирают взаимовыгодный вариант расчетов либо на основе обусловленной платы за предоставленные технические средства, либо на основе оплаты за единицу пропущенного трафика, либо на основе распределения доходов операторов.

**Управление качеством услуг.** Внедрение на предприятии связи методической поддержки организации контроля и управления качеством услуг способствует повышению конкурентных позиций на рынке связи. Методические разработки ЛО ЦНИИС по оценке качества услуг связи помогают предприятию внедрить системы показателей качества услуг, качества обслуживания потребителей, а также нормативов этих показателей<sup>1</sup>.

Кроме того, методические рекомендации в области качества услуг содержат описания методов измерения показателей качества услуг и обслуживания как на основе объективных измерений на сети связи предприятия, так и на основе субъективных оценок качества с точки зрения самих потребителей. В целях расчета интегрального показателя потребительской оценки качества услуг, разработан метод анкетирования, включающий расчет значений показателей качества и их весовых коэффициентов.

Использование методик, рекомендаций и инструкций предоставляет предприятию возможность принятия обоснованного управленческого решения, обеспечив минимизацию затрат при соблюдении нормативного или заявленного качества услуг и обслуживания. Внедрение на предприятии связи методических разработок ЛО ЦНИИС в области контроля и управления качеством услуг способствует повышению конкурентных позиций предприятия на рынке связи.

**Управление численностью персонала.** Методические разработки в этой области выполняются в ЛО ЦНИИС на основе целей функционирования предприятия (миссии, задач, стратегии развития, компетенций), детального анализа организационной структуры предприятия, анализа состава оборудования сетей электросвязи и служебной документации по структуре и компетенции персонала.

Расчет нормативов численности персонала производится для каждого структурного подразделения управления и производства с учетом задач, стоящих перед подразделением (центром, отделом, лабораторией), квалификации персонала и трудозатрат по группам выполняемых работ.

<sup>1</sup> Помимо методических разработок для оценки качества услуг связи ЛО ЦНИИС предлагает предприятиям такие инженерно-технические изделия, как ПРИЗМА, АМУЛЕТ и КРАБ.

Значение трудозатрат рассчитываются с помощью метода экспертных оценок, разработанного в ЛО ЦНИИС. Данная разработка сопровождается инструкциями для ввода новых данных и пересчета численности персонала при структурных, организационных и технологических изменениях на предприятии. Например, при изменении объема ряда работ по причинам организации новых структурных подразделений, внедрения нового оборудования и изменения системы обслуживания данная методика позволяет учесть изменения и оптимизировать человеческие ресурсы по количественным и квалификационным параметрам.

**Оценка эффективности инвестиций.** Методическая разработка направлена на повышение точности оценки эффективности инвестиционных проектов. Применение данной разработки способствует выбору оптимального варианта инвестиций.

С помощью этой разработки предприятие определяет технико-экономические и финансовые показатели на стадиях проектирования объектов связи.

Методическая разработка предоставляет предприятию следующие возможности:

- оценить эффективность конкретного инвестиционного проекта;
- оценить его экономическую целесообразность;
- выбрать оптимальный вариант из представленных к рассмотрению технических решений по критерию наибольшей эффективности инвестиций;
- рассчитать общий объем инвестиций;
- оценить величину необходимых заемных средств и возможность своевременного погашения кредита и уплаты процентов за кредит.

Разработка дает возможность оценить финансовые результаты инвестиционного проекта по годам проектируемого периода (тарифные доходы, эксплуатационные расходы, нераспределенная прибыль), что создает у предприятия адекватное понимание результатов принимаемых инвестиционных обязательств.

**Маркетинг услуг связи.** Методические разработки в области маркетинга направлены на формализацию, преобразование исходных данных, информационного содержания и рабочих гипотез в последовательность определений и зависимостей. В результате чего создаются математические и поведенческие модели и характеристики данных объектов рынка.

При этом максимально используется вторичная информация о состоянии рынка, покупательной способности, отложенном спросе и других факторах.

Одна из наиболее востребованных разработок ЛО ЦНИИС – «Методические рекомендации по формированию оптимального предложения предприятия связи на региональном рынке услуг». Используя рекомендуемые математические зависимости, предприятие может прогнозировать уровень развития связи в регионе для оценки собственной доли на рынке по каждому виду предоставляемых услуг. Методические рекомендации содержат этапы разработки новых услуг и порядок расчета емкости рынка для каждого нового предложения.

Также предприятию предоставляются рекомендации по стратегическому и тактическому планированию предложения новой услуги и осуществлению маркетингового контроля процесса их внедрения. Планирование реализации продукции и оказания услуг возможно на основе мониторинга рынка связи, рейтинговой оценки предприятий связи.

Методические разработки в области маркетинга служат обоснованием для принятия взвешенных управленческих решений по оптимизации практически всех видов ресурсов предприятия связи.

**Разработка бизнес-процессов, реинжиниринг бизнес процессов.** Методическая разработка по формированию бизнес-процессов предназначена для внедрения на предприятии связи процессного управления и, при необходимости, реорганизации бизнес-процессов. Управление деятельностью предприятия связи как системой бизнес-процессов отличается наибольшей эффективностью в отличие от традиционного управления функциональными областями, такими, как отделы и службы финансов, маркетинга, производства и др. Выполняется организационное проектирование с выделением и описанием бизнес-процессов, т. е. совокупности работ, имеющих временное начало и завершение (точки организационного входа и выхода информации об изменениях ресурсов предприятия). Рекомендации содержат также описание структуры бизнес-процессов, выстроенных в порядке иерархии вертикальных связей как между смежными работами внутри подразделения, так и между сквозными работами нескольких подразделений. В дополне-

ние разрабатывается и горизонтальное описание бизнес-процессов. И в первом, и во втором описаниях структур бизнес-процессов показывается, как эти работы взаимосвязаны между собой, в какой последовательности они выполняются, и какие информационные, материальные и финансовые потоки являются для них общими.

Таким образом, предприятие связи получает описание своей деятельности, в терминах бизнес-процессов, «как должно быть». И на основе полученных рекомендаций может приступить к внедрению процессного управления деятельностью предприятия.

Например, выполнение бизнес-процесса «Выполнение НИР и ОКР» в ЛО ЦНИИС происходит при взаимодействии различных центров, отделов и лабораторий и участия временных трудовых коллективов. Для координации такого бизнес-процесса назначается руководитель (главный конструктор) проекта. При сквозном описании работ этого бизнес-процесса его выполнение становится прозрачным для контроля промежуточных сроков, ответственных лиц и конечных результатов процесса.

Предприятие, внедрившее процессный подход в управление, получает преимущества в виде непрерывности управления бизнес-процессами и контроля их стыков внутри системы бизнес-процессов. Когда деятельностью предприятия и ресурсами управляют как непрерывными стыкующимися процессами, достижение запланированного результата происходит с наибольшим эффектом.

Эффект процессной организации управления достигается за счет возможностей постоянного контроля и улучшения бизнес-процессов,

а, следовательно, получения конкурентных преимуществ. Процессное управление нацелено на конечный результат, на то, что сделано для удовлетворения запросов потребителя, а не на контроль выполнения служебных обязанностей отдельного исполнителя.

Рассмотренные методические разработки в совокупности составляют методический инструментарий для управления экономикой предприятия связи.

В целях успешного функционирования научные разработки должны сопровождать полный цикл управленческих функций от планирования и прогнозирования до контроля и анализа результатов деятельности.

Для предприятий связи различных форм собственности, министерств и ведомств научная продукция выступает в роли результатов прикладных экономических исследований в виде интеллектуального ресурса их основной деятельности. Так обеспечивается систематизация и плановый характер работ, обеспечение качества услуг, сокращение необоснованного дублирования, устойчивость финансирования, стимулирование персонала.

Развитие методического инструментария для управления экономикой предприятия связи должно иметь опережающий характер во избежание экономических потерь вследствие принятия ошибочных или несвоевременных управленческих решений. Отсюда с очевидностью следует, что использование методического инструментария для управления экономикой предприятия связи является одним из важных видов интеллектуальных ресурсов производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузнецова, О.К.** Определение показателей качества телефонных услуг по методикам France Telecom [Текст]/О.К. Кузнецова, З.Б. Ревелова//Вестник связи International.–2000.–№ 1.–С. 30–37.
2. **Кучерявый, А.Е.** Совершенствование основных принципов доступа к сетям связи общего пользования для сетей различных типов и форм собственности [Текст]/А.Е. Кучерявый, О.К. Кузнецова, З.Б. Ревелова, А.Л. Цуприков//Федеральный справочник. Связь и информатизация в Российской Федерации.–М.:

Центр стратегических программ, 2001.–С. 169–177.

3. **Кузнецова, О.К.** Управление качеством на предприятии связи от осознания проблемы до внедрения системы менеджмента [Текст]/О.К. Кузнецова, С.К. Козлова//Метрология и измерения в связи.–2002.–№5.–С. 34–37.

4. **Kusnetsova, O.K.** HR Innovations in Russian Telecommunications [Текст]/О.К. Kusnetsova, A.V. Cherkasova//Regional European conf. of International Telecom. Society.–Netherlands, Amsterdam.–2006.

## ФОРМИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСУП

Прогнозирование трудоемкости сопровождения программного обеспечения практически всегда осуществляется с большой погрешностью. Доля проектов, выполненных в срок, не превышает 70 % [1], в то время как важность своевременного внедрения таких информационных систем, как АСУП, чрезмерно высока. В процессе эксплуатации АСУП возникает необходимость постоянного совершенствования (модернизации) программного обеспечения ввиду изменений организационных и производственных процессов, законодательства, отраслевых политик и иных регламентов. Каждому запросу на изменение системы необходимо сопоставить оценку трудоемкости его реализации, которая является *ключевой информацией* для принятия решений о реализации запроса, расчете экономической эффективности модернизации, планировании этапов модернизации системы и выборе способа реализации.

Точность и сроки вычисления оценки изменений программного и информационного обеспечения определяют правильность и своевременность принятых решений. Увеличение времени формирования оценки или снижение ее точности приводят к ошибкам в реализации системы, и, как следствие, к большим финансовым потерям. Поэтому *задача повышения точности и скорости формирования оценки изменений программного обеспечения является крайне актуальной.*

Оценка трудоемкости изменений для АСУП строится на основании анализа требований к системе. Главная проблема получения оценки – большая размерность исходных данных, множественность и многомерность их представлений на каждом этапе жизненного цикла программного продукта. Вторая проблема построения оценки – наличие ошибок в требованиях, связях между

ними и неоднозначность их интерпретации. Третья проблема – это отсутствие определенных в явном виде связей, отражающих приоритетные направления распространения изменений.

Работы в области формирования оценки изменений ведутся в течение нескольких десятков лет силами российских и зарубежных ученых, но и сегодня большинство из перечисленных проблем не решено [2].

Разработка и поддержка методов ручной трассировки крайне затратна [3], а определение трассировочных связей между проектными моделями различных уровней абстракции не тривиальна даже для экспертов. Кроме этого отсутствует единый подход к классификации взаимосвязей требований [4] и несмотря на то, что преимущества трассировки известны, ее реализация на практике дается с большим трудом.

### Цель работы

В данной статье исследуются пути решения этих проблем с целью повышения точности и скорости формирования оценки изменений в период создания и сопровождения программных систем класса АСУП.

Оценка изменений для систем класса АСУП рассчитывается на основании анализа моделей, представляющих требования к системе [5]. Процесс формирования оценки изменений (ФОИ) основан на процессе проектирования, поэтому не формализуем. Точно определить трудоемкость изменений можно только после выполнения всех изменений. Оценка трудоемкости изменений для планирования всегда рассчитывается на неполных данных, т. к. в приемлемые для принятия решения сроки не возможно не только провести полное проектирование, но и собрать данные, необходимые для анализа.

Основными факторами, определяющими точность и скорость ФОИ, являются качество исходных данных и опыт эксперта. Поскольку сам процесс ФОИ не формализуем, основное направление повышения точности и скорости ФОИ – это устранение проблем обработки исходных данных и создание условий для накопления опыта ФОИ экспертом.

С учетом возрастающей сложности, коллективного характера работ и непрерывного потока запросов на изменение системы повышение точности и скорости ФОИ невозможно без использования формализованных методов описания требований, позволяющих обеспечить контроль возникновения или предотвратить появление ошибок в описании требований, а также автоматизировать поиск требований, связанных с изменяемыми.

С учетом особенностей процесса планирования в организациях, реализующих различные типы крупных проектов по разработке сложного программного обеспечения, разработан следующий набор требований к методу ФОИ.

Метод ФОИ должен быть основан на унифицированном формализованном методе описания требований, сокращающем размерность представления исходных данных для ФОИ, позволяющем автоматически контролировать ошибки в них и определять связи между ними.

Должен содержать: формальное определение понятия «требование»; описание структуры требований; формальный язык описания требований с однозначно определенной семантикой; правила контроля семантических ошибок в требованиях; правила определения связей между требованиями, отражающие приоритетные направления распространения изменений, позволяющие автоматизировать процесс поиска таких связей; правила формирования оценки изменений.

Метод должен быть открыт с точки зрения расширения модели понятий и правил описания для учета опыта и специфики технологических процессов предприятия-разработчика.

Для успешного внедрения метода ФОИ в производственную практику необходимо обеспечить возможность интеграции данного метода с методами моделирования системы, используемыми в проекте по разработке АСУП.

Структура требований метода (*модель трассировки*) должна:

- 1) отражать весь объем изменений;
- 2) позволять легко проецировать изменения в

проектных моделях на описание требований для ФОИ и обратно;

- 3) быть применима для любых проектов по разработке АСУП – не должна зависеть от парадигмы проектирования, технологии и средств разработки;

- 4) позволять определять правила контроля семантических ошибок в требованиях и приоритетные направления распространения изменений;

Структура требований не должна фиксировать степень детализации описания требований и усложнять описание требований.

Анализ существующих методов формирования оценки изменений показал, что они позволяют решать данную задачу, но не удовлетворяют в полной степени сформулированным выше требованиям. В большинстве случаев это связано с плохо проработанным терминологическим базисом в этой области и отсутствием структурированного подхода к внедрению ФОИ, подразумевающего предварительную формализацию целей и задач, которые планируется решать при помощи трассировки, а также требований к развитию модели трассировки, являющейся основой метода ФОИ.

В процессе эксплуатации такой подход приводит к попыткам использования одной модели трассировки для решения множества задач, определяющих взаимоисключающие требования к модели. Разрабатываются решения частных задач, не имеющие перспективы развития и широкого применения даже в рамках одной крупной компании.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать:

- 1) модель трассировки требований АСУП, удовлетворяющую поставленным требованиям;

- 2) подход к формализации описания требований и соответствующую ему систему формальных определений;

- 3) формальные определения типов ошибок в требованиях и возможные механизмы их контроля;

- 4) формальный метод ФОИ, удовлетворяющий поставленным требованиям;

- 5) реализацию метода ФОИ для практического применения при создании и эволюционном сопровождении АСУП.

#### **Требования к составу категорий модели трассировки**

Сформулированные требования к модели трассировки можно реализовать несколькими

стратегиями: обобщение (объединения структур проектных моделей); пересечение (конъюнкция структур проектных решений); глубокая детализация; упрощение. В разной степени они отражают стремления получить точную оценку за минимальное время.

*Нахождение сбалансированного решения, удовлетворяющего всем требованиям, является нетривиальной задачей.*

Исследования широкого класса регламентов, определяющих структуру требований к АСУП каркасных моделей архитектуры, методов анализа и проектирования, методологий разработки и онтологий, позволяют обосновать единственно возможный уровень абстракции построения модели трассировки, не зависящий от парадигмы и технологии проектирования. Этот уровень задают три категории – две категории *процесс*, *объект*, соответствующие базовым понятиям структурного и объектно-ориентированного подхода, и категория *правила*, необходимая для повышения скорости определения распространения изменений по двум измерениям. Кроме этого модель трассировки должна отражать все четыре уровня требований, соответствующих уровням схемы Захмана [6].

Предлагаемый набор категорий является необходимым и достаточным для задачи ФОИ, т. к. любая характеристика системы реализуется посредством процессов или объектов системы и любые изменения должны отразиться на объектах или процессах АСУП. Более того, если такое сопоставление не сделано, это можно считать ошибкой проектирования. Безусловно, все правила отражаются на объектах и процессах системы,

но т. к. именно с изменением правил (законодательства, политик предприятия) чаще всего связаны запросы на изменение системы, имеет смысл обозначить эту категорию явно.

Выделение трех категорий в модели трассировки позволяет определить правила контроля целостности и непротиворечивости описания требований. Для этого необходимо задать семантически значимые отношения между данными категориями.

С учетом разработанных требований можно построить базовую модель трассировки требований к ПО – треугольник трассировки (ТТ) и метод интеграции описания требований для сквозного отслеживания распространения изменений.

### Базовая модель трассировки требований для ФОИ

Треугольник трассировки – минимальная модель трассировки ПО – способ структурирования описания требований для ФОИ, определяет необходимые, семантически значимые отношения между минимальным набором категорий, необходимым для описания требований для ФОИ.

Треугольник представлен на рис. 1 и отражает категории трассировки и допустимые связи между ними.

Треугольник трассировки определяет три типа категорий – *правило*, *объект*, *процесс*, и пять типов связей – *определяет*, *обрабатывает*, *декомпозиция*, *являются классом*, *эквивалентны*. Отношения «декомпозиция», «являются классом» позволяют выбирать произвольную детализацию описания требований, что необходимо для эффективного управления трудозатратами на под-

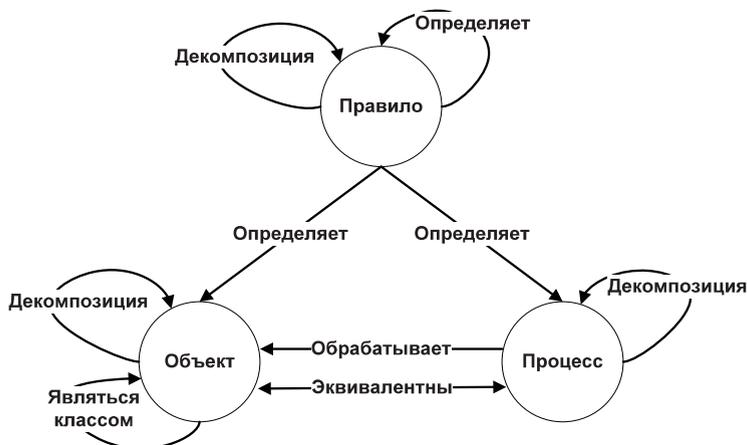


Рис. 1. Треугольник трассировки

держание трассировки требований. Несмотря на простоту и небольшой набор категорий, модель позволяет определить ряд правил, ограничивающих целостность описания требований. Например, «для любого объекта существует процесс его обрабатывающий».

Модель позволяет легко интегрировать все методы описания требований, используемые в проекте, для сквозного отслеживания распространения изменений. Она не требует переопределения связей при изменении технологии проектирования – достаточно описать связи нового метода проектирования с категориями базовой модели трассировки и удалить лишние. Такой подход к интеграции позволяет значительно увеличить скорость и точность формирования оценки изменений даже при использовании неформализованных методов проектирования.

Простота соотнесения проектной информации с категориями треугольника, простые и понятные каждому разработчику типы связей между категориями, позволяют сократить тот объем ошибок разработчика, который не может быть проконтролирован автоматически.

Следует отметить, что предлагаемая схема интеграции не отменяет наработки по интеграции отдельных методов, которые могут быть успешно использованы совместно.

### Комплекс решений, повышения точности и скорости формирования оценки изменений

Для реализации базовой модели трассировки, метода интеграции описания требований и планирования, предлагается комплекс решений, позволяющий повысить точность и скорость

формирования оценки изменений. Взаимосвязи между компонентами данного комплекса проиллюстрированы на рис. 2.

Центральным элементом данного комплекса решений является Базовый Метод ФОИ для систем, разрабатываемых на основании спецификаций требований (далее – Метод). Метод фиксирует общие решения по формализации задачи ФОИ для систем данного класса. Данные решения основаны на разработанном подходе к формализации описания требований, согласованной системе определений и разработанной классификации ошибок в требованиях, которые также являются элементами комплекса решений

В Методе формализованы способ структурирования описания требований для решения задачи ФОИ, механизмы контроля ошибок в описании требований и правила формирования оценки изменений.

В языке описания требований Метода, в отличие от других методов описания требований, изначально заложена и контролируется с помощью аксиом поддержка трассировки требований.

Разработанный Метод является минимальным и подлежит расширению для выбранной предметной области. Для обоснованной разработки расширений Метода для конкретной предметной области предлагается Технология разработки расширений базового метода ФОИ, определяющая, в т. ч., критерии оценки расширения Метода.

Результатом применения Метода и Технологии для предметной области АСУП является Сбалансированная Трехуровневая Онтологическая Модель (далее – СТОМ).



Рис. 2. Комплекс решений для ФОИ

### Подход к формализации описания требований для ФОИ

Разработанный Метод ФОИ основан на следующих ключевых положениях.

- Требование к системе определяется как *высказывание* о свойствах системы.
- Правила контроля ошибок также представляются в виде высказываний. Единый способ представления требований и правил контроля ошибок в виде высказываний позволяет автоматизировать контроль ошибок.
- Для представления требований в строгом соответствии с моделью трассировки предлагается задавать систему предикатов, фиксирующую структуру таких высказываний. Тогда конкретные требования к системе – это высказывания, построенные с использованием данных предикатов, и их структура всегда будет соответствовать модели трассировки.
- Взаимосвязанные требования определяют как *взаимосвязанные высказывания*, что позволяет автоматически выявлять связи между требованиями.

В соответствии с данным подходом разработана согласованная система определений (ССО), включающая понятия непосредственно связанные с задачей формирования оценки изменений, в т. ч. понятия «требование» и «взаимосвязанные требования».

Проиллюстрируем данный подход применительно к формализации треугольника трассировки (рис. 3). Определим следующие предикаты: *Pobject()* – *являться объектом*, *Pprocess()* – *являться процессом*, *Pprocessed(,)* – *обрабатывается в*.

Требование 1 связано с требованием 2, т. к. они ссылаются на одну и ту же константу *b*.

Тогда конкретные требования к системе будут выглядеть следующим образом (в скобках приведена интерпретация): *Pobject(a)* (*a* – объект), *Pprocess(b)* (*b* – процесс), *Pprocessed(a, b)* (*a* обрабатывается в *b*), где каждое высказывание – это требование к системе.

В этом случае разработчик, определяя связи между элементами, соответствующими категориям модели трассировки, определяет требования к системе, а связи между требованиями выводятся автоматически.

Такой подход к формализации описания требований обеспечивает возможность: расширения модели; визуализации модели требований для ФОИ; применения существующего инструментария управления требованиями для ее реализации.

### Базовый метод формирования оценки изменений

На основе разработанного подхода к формализации описания требований и классификации ошибок в требованиях был разработан метод формирования оценки изменений для систем,

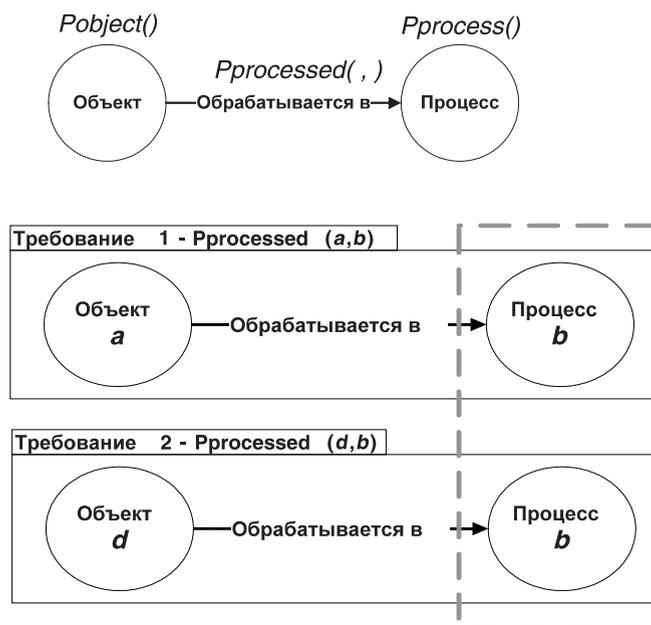


Рис. 3. Иллюстрация связи требований

разрабатываемых на основании спецификаций требований (Метод). Математическим аппаратом Метода является аппарат формальных систем и логики предикатов первого и второго порядка.

Разработанный Метод представляет собой формальную систему и содержит все три ее компонента – формальный язык описания требований, аксиомы, определяющие правила описания требований и правила вывода – правила формирования оценки изменений. Метод является открытым – его компоненты (язык и правила описания требований) должны быть дополнены, для учета специфики заданной предметной области. Это позволяет повысить точность формирования оценки изменений за счет покрытия большего числа ошибок правилами описания.

Язык описания требований базового метода имеет двухуровневую структуру. Первый уровень оперирует предметными константами и содержит предикаты первого порядка. Второй уровень оперирует требованиями и правилами их интерпретации и основан на предикатах второго порядка. Структура требований – модель трассировки, в базовом методе минимальна, т. к. фиксирует лишь подход к формализации и задана одним унарным предикатом и одним  $n$ -арным:

- **Object( $e$ )** – унарное обобщенное отношение первого порядка, означающее, что *аргумент данного отношения является предметной константой*.

- **GeneralRelation( $e_1, e_2, \dots, e_n$ )** – обобщенное отношение первого порядка свободной аргументности более либо равной 2, аргументы данного отношения являются *предметными константами*, а отношение означает, что *предметные константы, включенные в отношение, рассматриваются в совокупности в частной проектной модели (ЧПМ) ФОИ*.

Для описания свойств требований, необходимых для формирования оценки изменений на заданной онтологии, разработаны и включены в Метод предикаты второго порядка и правила их интерпретации, например:

- **Changed( $v$ )** – унарное отношение второго порядка, которое означает что *интерпретация требования, являющегося аргументом данного отношения, изменена*, где  $v$  – формальное требование ЧПМ;

- **Suspected ( $v_1, v_2$ )** – бинарное отношение второго порядка, которое означает, что *интерпретация требования, являющегося вторым ар-*

*гументом данного отношения, подозревается на изменение в связи с изменением интерпретации требования, являющегося первым аргументом данного отношения*. Данное отношение рефлексивно, несимметрично, нетранзитивно;

- **Connected ( $v_1, v_2$ )** – бинарное отношение второго порядка, которое означает, что *аргументы данного отношения являются взаимосвязанными требованиями*. Данное отношение рефлексивно, симметрично, нетранзитивно;

- **Equivalence ( $v_1, v_2$ )** – бинарное отношение второго порядка, которое означает, что *аргументы данного отношения являются эквивалентными требованиями*. Предикат необходим для контроля ошибок дублирования требований.

В Методе определены механизмы контроля ошибок в описании требований – это аксиомы (правила описания требований). Разработана структура аксиом Метода. Структура аксиом ориентирована на покрытие классов ошибок, определенных в классификации ошибок. Разработано и включено в Метод три общих аксиомы, сформулированных в виде высказываний с использованием предикатов второго порядка.

Для формирования оценки изменений разработаны правила вывода (правила формирования оценки изменений) сформулированные на языке логики предикатов второго порядка.

- **Connected ( $v1, v2$ )**  $\Leftrightarrow \exists$  объект  $e$  и требования  $f1, f2$ : **Object( $e$ )** используется в  $v1$ , так что  $f1(e)$  и используется в  $v2$ , так что  $f2(e)$ , *то требования  $v1$  и  $v2$  являются взаимосвязанными*.

- **Suspected( $v1, v2$ )**  $\Leftrightarrow$  **Changed( $v1$ )** и **Connected ( $v1, v2$ )** – *связано напрямую с измененным*.

- **Suspected( $v1, v3$ )**  $\Leftrightarrow$  **Suspected( $v1, v2$ )** и **Connected ( $v2, v3$ )** – *связано косвенно с измененным*.

Разработанный Метод позволяет легко расширить набор правил вывода для уточнения алгоритма распространения изменений с учетом более детальной проработки возможных видов изменений. Для этого достаточно ввести второй аргумент в предикат Changed, кодирующий тип изменения и написать соответствующие каждому типу изменений правила вывода.

Технология разработки расширений базового Метода основана на итеративном процессе разработки онтологий. Для оценки разрабатываемого набора отношений предлагается использовать Гештальт-принципы построения онтологий [7].

### Сбалансированная трехуровневая онтологическая модель требований для ФОИ ИО и ПО АСУП (СТОМ)

В качестве расширения базового метода для предметной области – «разработка АСУП», в соответствии с Технологией была разработана Сбалансированная трехуровневая онтологическая модель требований. СТОМ детализирует структуру описания требований с учетом специфики процесса разработки АСУП, что позволяет ввести дополнительные правила контроля ошибок в описании требований, оказывающих влияние на ФОИ.

СТОМ представляет собой модель онтологии предметной области разработки ИО и ПО АСУП и является отражением треугольника трассировки на всех четырех уровнях схемы Захмана и наследует все его преимущества. СТОМ отражает процесс последовательного преобразования бизнес-требований в логическую модель системы и физическую модель системы, что соответствует этапам проектирования АСУП. Реализация треугольника трассировки отдельно для трех этапов проектирования позволяет ввести дополнительную группировку требований к АСУП, что упрощает работу с множеством требований при увеличении их количества. В совокупности с правилами вывода Метода, СТОМ представляет собой метод ФОИ для АСУП.

*Множество аксиом СТОМ расширено, по сравнению с базовым методом в 14 раз, что позволяет сократить объем ошибок проектирования*

и повысить точность и скорость ФОИ. СТОМ открыта и может быть дополнена аксиомами, так же как и базовый метод ФОИ.

Несомненным преимуществом СТОМ перед остальными моделями трассировки является простота ее применения специалистами различной специализации и квалификации. Сочетание в СТОМ формализованного подхода и его наглядного представления в виде графа значительно упрощает ее освоение и применение на производстве.

В ходе проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены следующие результаты.

Описаны требования к методу формирования оценки изменений с учетом особенностей применения метода для процесса планирования.

Разработан новый комплекс решений формализации задачи и построения метода ФОИ, удовлетворяющий требованиям. Комплекс решений позволяет:

сократить сроки и расходы на внедрение и сопровождение – обучение, разработку технологических регламентов, настройку программных систем, модернизацию;

сократить объем работ по каждому запросу на изменение;

повысить точность и скорость ФОИ в процессе создания и эволюционного сопровождения систем, разрабатываемых на основании спецификаций требований, в т. ч. АСУП, а также сократить объем дорогостоящих ошибок проектирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демарко, Т. Человеческий фактор: успешные проекты и команды [Текст]/Т. Демарко, Т. Листер.–Символ Плюс, 2005. –С.–249.
2. Model traceability [Текст]/Aizenbud-Reshef, B.T. Nolan, J. Rubin [et al.]/IBM SJ. –2006. –№ 45(3). –Р. 515–526.
3. Коберн, А. Современные методы описания функциональных требований к системам [Текст]/А. Коберн. –М.: Лори, 2002. –С. 267.
4. Глас, Р. Факты и заблуждения профессионального программирования [Текст]/Р. Глас.–Символ Плюс, 2007. –С. 232.
5. Мадорская, Ю.М. Проблема формирования оценки сложности изменений программного обеспече-

ния при эволюционном сопровождении АСУП [Текст]/Ю.М. Мадорская, М.А. Курочкин//Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке: Матер. XV Междунар. науч.-метод. конф.–СПб, 2008.–С. 90–92.

6. Zachman, J.A. Extending and formalizing the framework for information systems architecture [Текст]/J.A. Zachman, J.F. Sowa//IBM SJ.–1992. –Vol. 31.–№ 3.–Р. 590–561.

7. Гаврилова, Т.А. Гештальт – принципы построения онтологий [Текст]/Т.А. Гаврилова//Тезисы докл. II Междунар. конф. по когнитивной науке.–СПбГУ, 2006.–Т. 1.–С. 240–242.

УДК 004.651.4

*А.М. Бородин, С.В. Поршнева*

## **О ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ПОСТРОЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИНДЕКСОВ ОСНОВНОЙ ПАМЯТИ В OLAP-СИСТЕМАХ**

В [1] рассмотрены вопросы построения OLAP-систем на основе индексирования методом R-дерева в основной памяти (in-memory indexing [2]). Данная работа опирается на открытую программную библиотеку «Индексирование многомерных классифицированных данных» [3] (далее – ИМДК), в которой реализованы основные механизмы индексирования данных и построения различных аналитических вычислений.

В последние несколько десятилетий производительность вычислительных средств увеличивалась за счет увеличения тактовой частоты центральных процессоров. Многопроцессорные системы были распространены в сегменте серверных компьютеров, однако рабочие станции и мобильные устройства редко обладали большим количеством центральных процессорных устройств. В областях, тесно связанных с большим количеством арифметических операций, получила распространение SIMD архитектура (Single Instruction Multiple Data) [4] и более удобная в программировании SIMT технология (SIMD + Multitasking) [4]. При этом необходимо отметить, что данный подход ориентирован на выполнение большого количества арифметических операций над относительно небольшим количеством данных, что не подходит для решения задач построения OLAP-систем, в которых, напротив, требуется выполнение относительно небольшого количества арифметических операций над большим объемом данных.

Принимая во внимание, что повышение производительности компьютеров в последние годы осуществляется за счет увеличения количества процессоров в вычислительной системе, становится очевидной необходимость разработки подходов, ориентированных на использование технологий параллельного программирования не только при разработке серверных приложений, но и при создании программного обеспечения, ориентированного на работу на рабочих станциях, ноутбуках, нетбуках, коммуникаторах.

В статье описан подход, ориентированный на использование индексов основной памяти, созда-

ваемых в библиотеке ИМДК. Показано, что предложенный подход оказывается более рациональным при реализации аналитических вычислений на клиентской, но не серверной стороне, которая в данном случае представляет собой хранилище данных.

### **Особенности параллельной обработки данных при построении индекса**

Для построения индекса на серверных системах перед началом работы с данными применяются алгоритмы массовой загрузки (bulk loading) [5], позволяющие построить индекс, оптимальный с точки зрения скорости проведения вычислений. Построенный индекс обновляется при изменении данных, однако, при нормальной работе он перестраивается крайне редко. Когда речь идет о клиентской ЭВМ и хранении индекса в основной, а не в дисковой памяти компьютера, построение индексов всех наборов данных оказывается проблематичным, поскольку пользователь запускает приложение, работает с определенными наборами данных, после чего закрывает приложение. Данные индексирования, с которыми работал пользователь, при этом теряются. Таким образом, производительность работы вычислительной системы оказывается зависящей не только от скорости расчетов, но и от времени загрузки данных.

Анализ алгоритмов массовой загрузки показывает, что они достаточно легко распараллеливаются на несколько процессоров. Основное требование, обеспечивающее работоспособность этих алгоритмов, – наличие одновременно всех данных, которые будут индексироваться. В то же время получение необходимых данных (в большинстве случаев – это передача информации по сети) занимает время. Алгоритмы динамического обновления (в данном случае речь идет о вставке записей в индекс), напротив, позволяют начинать построение индекса сразу после загрузки небольшого количества данных, т. е. процесс получения данных проходит одновременно с процессом построения индекса. Таким образом, ценой отно-

сительно незначительного снижения скорости проведения расчетов потенциально существует возможность ускорить старт системы, сократив время от запроса анализа данных со стороны пользователя до получения готового индекса со всеми необходимыми данными.

Ограничивающими факторами при получении данных являются как скорость работы системы хранения данных, так и пропускная способность сети передачи данных. В условиях, когда скорость получения данных является узким местом системы, организация процедуры построения индекса параллельно с загрузкой данных обеспечивает готовность индекса к использованию практически сразу после загрузки последней строки данных. Однако время последовательного построения индекса может превышать время получения данных.

Для решения данной проблемы представляется рациональным использовать вычислительные мощности нескольких центральных процессоров, доступных компьютеру. Далее высказанная идея будет проиллюстрирована на примере синхронизации древовидного индекса.

**Синхронизация древовидного индекса**

R\*-дерево [6] является основной индексирующей структурой программной библиотеки ИМДК.

Процесс вставки записи в древовидный индекс проходит в два основных этапа. Первый этап – поиск листового узла дерева, в который необхо-

димо вставить запись. При этом рассмотрение каждого узла от корневого до узлового сопровождается установкой блокировки (Reader-Writer Lock [7]) чтения узла для того, чтобы из соседних потоков рассматриваемый узел не мог быть изменен (первая строка рис. 1).

Далее, после того как узел найден, необходимо установить блокировки на запись на все узлы дерева, т. к. вставка в большинстве случаев вызовет изменение во внутренних страницах индекса (вторая строка рис. 1).

Возможные конфликты синхронизации иллюстрирует третья строка рис. 1, на которой представлена ситуация, когда корневой узел заблокирован в режиме чтения R3, в то время как идет подъем по дереву двух блокировок на запись W1 и W2. Блокировки W1 и W2 не могут занять корневой узел, т. к. он читается R3. Аналогично, R3 не может занять ни одного из нижележащих узлов, т. к. они заняты W1 или W2. Отметим, что в данном примере совершенно не важно, является ли указанный узел корневым для всего индекса или лишь для приведенного подграфа – части большей, непоказанной индексирующей структуры.

Для разрешения данного конфликта необходимо, чтобы R3 была снята с корневой страницы до того как R3 будет установлена на какой-либо выбранный нижележащий узел.

Соответственно, если в алгоритме вставки insert (две версии алгоритма детально описаны в [6, 8]), использующем блокировку вставки R3, для продолжения поиска места в дереве для вставляе-

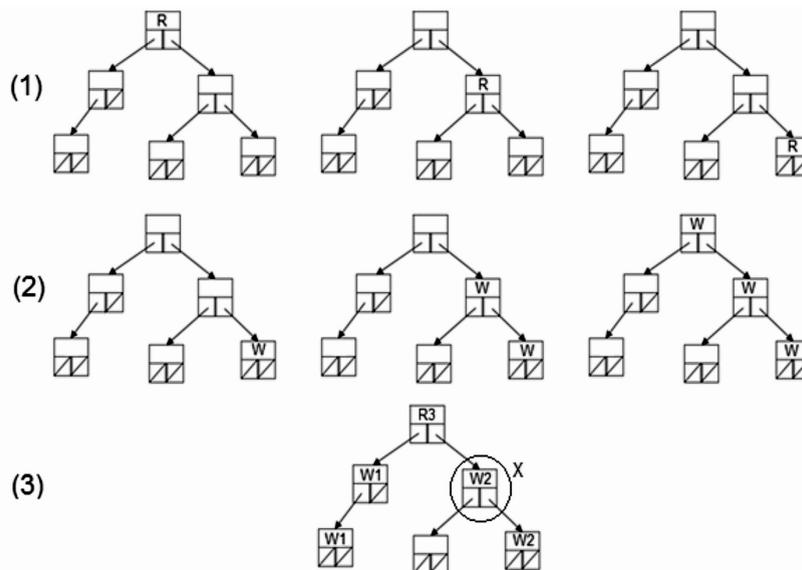


Рис. 1. Блокировки в индексирующей структуре данных

мой записи был выбран к рассмотрению узел  $X$ , который на данный момент занят блокировкой на запись  $W1$ , в дальнейшем нам необходимо сохранить пригодность данного узла  $X$  для продолжения алгоритма insert.

Ввиду того, что происходит заполнение индекса данными, мы можем гарантировать, что на данном этапе записи из индекса не удаляются, и вставленные листовые записи не изменяются. Для классического R-дерева [8] этого оказывается вполне достаточно, однако R\*-дерево применяет дополнительный алгоритм оптимизации индексирующей структуры, называемый *force reinsert*, поэтому на определенном этапе вставки данных этот алгоритм может применить удаление и повторную вставку части данных, с целью более оптимального их расположения в индексе.

Для того чтобы не допустить подобной ситуации, необходимо до снятия блокировки R3 установить узлу  $X$  признак, запрещающий применение на нем алгоритма reinsert. Далее, блокировка R3 снимается с корневой страницы, в определенный момент устанавливается на  $X$ , после чего запрет на reinsert снимается. Данный признак должен быть организован в виде инкрементального счетчика запретов, ввиду того, что вполне возможна одновременная установка нескольких запретов reinsert на один и тот же узел несколькими перемещающимися блокировками.

Необходимо отметить, что при тестировании ситуация конфликта запрета reinsert и признака запрета блокировки ни разу не была воспроизведена, что свидетельствует о ее достаточно редком

проявлении. Однако она теоретически возможна, и без применения описанного механизма синхронизации приведет к непредсказуемым последствиям, результатом которых, в лучшем случае, будет разрушение индексирующей структуры, а, в худшем, – расчет системой некорректных агрегатных значений при использовании индекса.

Таким образом, единственный недостаток данного подхода связан с необходимостью при вставке каждой записи получать блокировку записи на корневую страницу, которая в каждый момент времени, будучи единственной, является основным ресурсом, блокировка которого будет уменьшать производительность синхронизации при многопоточной работе с индексом.

### Балансировка параллельных загрузок

При получении данных к индексированию поток записей группируется блоками по 8192 записи. Каждый такой блок является заданием для потока загрузки данных, поэтому можно воспользоваться системным пулом потоков для создания потоков, которые будут выполнять эти задания. Однако с целью оптимизации синхронизационных потерь количество данных потоков не должно значительно превышать количество логических ядер процессоров на ЭВМ системы. В случае работы на однопроцессорной системе этот поток должен быть один. В случае работы на многопроцессорной системе, как показали проведенные эксперименты, наиболее эффективна стратегия использования на 50 % большего количества потоков загрузки, чем количество ядер процессоров.

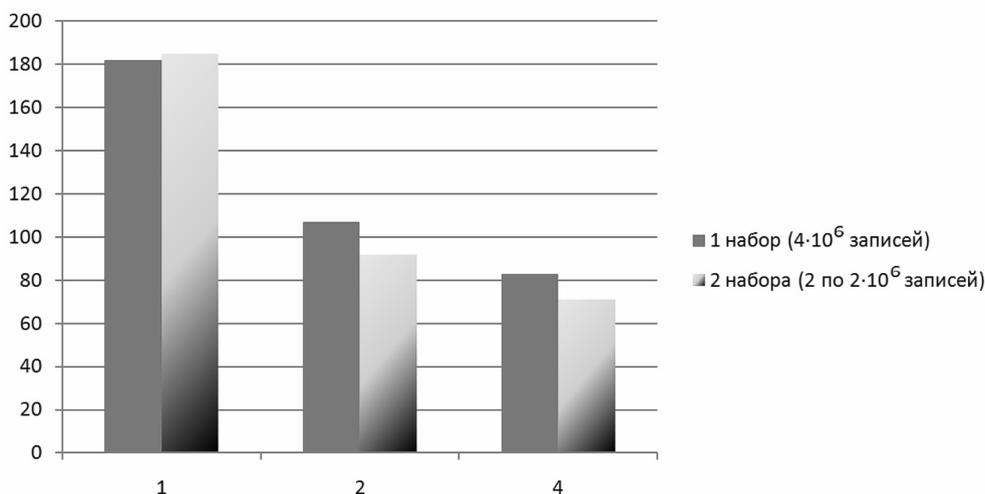


Рис. 2. Зависимость времени загрузки данных от степени параллелизма



В условиях, когда необходимо загружать несколько разных наборов данных, необходимо равномерно распределять между разными индексами количество потоков, выполняющих загрузку, что позволяет максимально освободиться от блокировок на основной разделяемый ресурс каждого из индексов – корневую страницу.

#### Экспериментальное тестирование подхода

Для проведения эксперимента была реализована синхронизированная версия программной библиотеки ИМДК. Загружались данные из MS SQL Server, связь с которым осуществлялась через 100 Мбит/с Ethernet. Загружаемые данные имели один атрибут типа decimal и были классифицированы по двенадцати измерениям. При загрузке 4 млн записей, загрузка на одном процессоре в среднем заняла 182 с, на двух процессорах – 107 с, на четырех – 83 с. При загрузке двух аналогичных по структуре наборов данных объе-

мом 2 млн записей время загрузки на одном процессоре составило 185 с, на двух процессорах – 92 с и на четырех – 71 с. Данные представлены в виде графика на рис. 2.

Небольшое замедление однопроцессорной загрузки при разделении набора данных на два, с нашей точки зрения, связано с тем, что СУБД параллельно читала два физически разнесенных набора данных. В этих условиях, несмотря на то, что поток загрузки был один, он переключался между блоками загрузки различных наборов данных.

Таким образом, предложенный способ загрузки данных достаточно хорошо масштабируется и, как следствие, использование технологий параллельного программирования значительно ускоряет работу системы. В этой связи в настоящее время осуществляется перенос библиотеки ИМДК на SIMD архитектуру.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бородин, А.М.** Сравнительный анализ возможностей и скорости обработки многомерных данных программными средствами бизнес-аналитики на основе индексирующих структур основной памяти [Текст]/А.М. Бородин, С.В. Поршневу//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика, Телекоммуникации, Управление.–2010.–№ 1.–С. 99–102.
2. Analysis Services in VertiPaq mode [Электронный ресурс]/[http://technet.microsoft.com/ru-ru/library/ee637273\(SQL.105\).aspx](http://technet.microsoft.com/ru-ru/library/ee637273(SQL.105).aspx)
3. Рекламно-техническое описание «Программная библиотека «Индексирование многомерных классифицированных данных» 45392457.00084-01 99 01. Инвентарный номер ВНИТИЦ 50200900990 [Текст] // Св. о рег. эл. ресурса № 14197 ОФЭРНИО.
4. **Таненбаум, Э.** Архитектура компьютера [Текст]/Э. Таненбаум.–СПб.: Питер, 2007.–5-е изд.–848 с.
5. **Бородин, А.М.** Использование пространственных индексов для обработки аналитических запросов и агрегирования многомерных данных в ИАС [Текст]/А.М. Бородин, С.В. Поршневу, М.А. Сидоров//Изв. Томского политехнического ун-та.–2008.–№ 5.–С. 64–86.
6. **Beckmann, N.** The R\*-tree: An Efficient and Robust Access Method for Points and Rectangles [Текст]/N. Beckmann, H.-P. Kriegel, R. Schneider [et al.]/Praktische Informatik.–Universitaet Bremen, 1991.–С. 322–331.
7. **Ramakrishnan, R.** Database Management Systems [Текст]/R. Ramakrishnan, J.Gehrke.–McGraw-Hill, Wisconsin.–2002.–899 с.
8. **Guttman, A.** R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching [Текст]/A. Guttman//SIGMOD Conf.–1984.–С. 47–57.

УДК 004.415.2.043

*Л.М. Курочкин*

## ВОПРОСЫ ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САД СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ

Повышение эффективности производства невозможно без интеграции информационных систем предприятия. Центральное звено интегрированной системы – подсистемы автоматизи-

рованного проектирования (САД), инженерных расчетов (САЕ), автоматизированное производство (САМ). Во время реализации нового проекта процессы проектирования, инженерных расчетов

и управление технологическим процессом выполняются последовательно, и в случае полного согласования промежуточных решений можно приступать к выпуску опытных образцов. Если указанное производственное оборудование отсутствует или невозможно реализовать требуемый технологический процесс, необходимо внести изменения в проектные решения и повторить предыдущие этапы конструкторского проектирования и инженерных расчетов. Многократное повторение цикла конструкторского проектирования приводит к увеличению сроков работы над проектом и его стоимости. Устранить эти издержки возможно путем интеграции АСУТП предприятия с распределенной автоматизированной системой эффективной организации технологической подготовки машиностроительного производства (РСТПП), в которой используется универсальное представление данных о технологических возможностях предприятий, обладающих оборудованием разного типа.

Основные задачи РСТПП – сбор, хранение и предоставление сведений о возможностях оборудования и технологических процессах предприятий, которые могут войти в производственную кооперацию.

Использование данных о возможностях оборудования не только своего предприятия, но и предприятий смежников, позволяет на этапе конструирования изделия выбирать только те решения, которые можно реализовать в данный момент. Таким образом, устраняется один из дорогостоящих циклов процесса проектирования и изготовления нового изделия – многократное согласование конструкторской и технологической документации, связанное с ограничениями и возможностями предприятий изготовителя.

Для реализации этой концепции необходимо создать метод разработки и эксплуатации специализированного информационного и программного обеспечения РСТПП машиностроительного производства.

Проектирование метода предусматривает системное решение задач функционального, информационного, алгоритмического, методического, технического и других видов обеспечения РСТПП. Рассмотрим функциональное и информационное обеспечение более детально.

#### **Функциональная модель блока обработки запросов пользователей**

Определим основной производственный процесс взаимодействия пользователей с РСТПП.

Основным процессом является поиск и предоставление пользователю всех вариантов исполнения заказа по реализации требуемой технологии, одной или нескольких операций, одного или нескольких переходов. Под вариантом исполнения заказа будем понимать предприятие, способное в настоящий момент времени выполнить заказ с требуемым качеством, т. е. предприятие, обладающее необходимыми технологическими возможностями. Понятие *технологическая возможность* включает в себя как наличие конкретной модели оборудования, так и совокупность всех компонентов, позволяющих в настоящий момент времени приступить к выполнению заказа. Набор этих компонентов включает наличие оснастки, заготовок, свободного времени, кадровое обеспечение и другие параметры производственного процесса. Технологическая возможность характеризует наличие необходимых и достаточных условий для начала выполнения заказа.

Бизнес-процессы формирования и обработки электронного представления производственного заказа предприятия представлены в нотации IDEF0 [5].

Описание технологических возможностей предприятия включает в себя следующие этапы: выбор из справочника оборудования РСТПП перечня моделей оборудования, расширенного наборами технологических операций и переходов; коррекцию значений параметров и атрибутов инструментальных переходов; установку значения загрузки оборудования; указание наличия инструментальной оснастки.

Описание технологического процесса (производственного заказа) формируется на базе классификаторов технологических операций и переходов РСТПП, используемых при описании технологических возможностей оборудования. Данная формализация описания производственных возможностей и потребностей промышленных предприятий позволяет работать в едином информационном пространстве, не только решать задачи поиска (как субподрядчиков, так и различных исполнителей технологического процесса силами собственного предприятия), но и проводить анализ отдельных предприятий и отрасли в целом.

На рис. 1 приведена диаграмма A0, описывающая механизм формирования наборов данных, необходимых для осуществления поиска исполнителей заказов. Для поиска оборудования используются параметры: наименование модели, тип, специализация станка. Для описания пере-

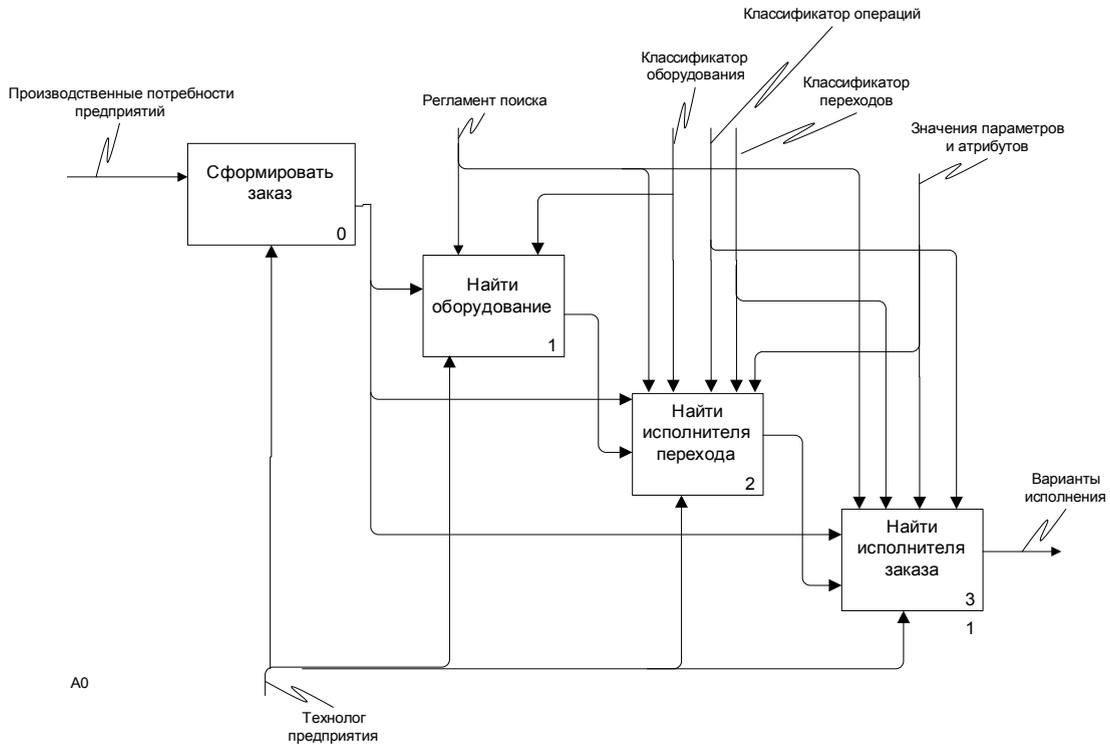


Рис. 1. Процесс поиска исполнителей заказа

хода используются технологические операции, наборы значений атрибутов и параметров перехода. Описание технологического процесса (заказа) включает четыре уровня: неформальную текстовую часть (опционально дополняемую электронной документацией), упорядоченный перечень технологических операций, упорядоченный перечень инструментальных переходов, набор параметров и атрибутов и их значения.

Подготовленные данные позволяют определить перечень предприятий, расширенных наборами моделей, способных обеспечить требования данного ТП, либо описание фрагментов ТП, выполнение которых невозможно мощностями, описанными в РСТПП.

На рис. 2. приведена диаграмма, отражающая порядок формирования четырехуровневого описания электронного представления технологического процесса.

Описанная методика формирования ТП обеспечивает уровень детализации описания ТП, необходимый для осуществления поиска и решения производственных задач.

**Информационное обеспечение модуля технологических возможностей.**

Для выполнения главной задачи РСТПП в со-

став информационного обеспечения включены следующие категории данных:

- индивидуальные данные о предприятии изготовителе;
- индивидуальные данные о предприятии заказчике;
- классификаторы ТО и ТП;
- классификаторы оборудования;
- технологические возможности;
- заказы предприятий.

Индивидуальные данные предприятия содержат юридический адрес, виды деятельности, контакты и любую дополнительную информацию о предприятии.

Классификаторы технологических операций и переходов содержат общепринятые соглашения для предприятий машиностроения.

Классификаторы оборудования содержат виды оборудования, типы и модели.

Технологические возможности содержат условия выполнения операций на оборудовании. Заказы предприятий содержат описание технологических процессов, операций, переходов и значения их параметров и атрибутов.

Классификатор переходов базируется на «Классификаторе технологических переходов машино-

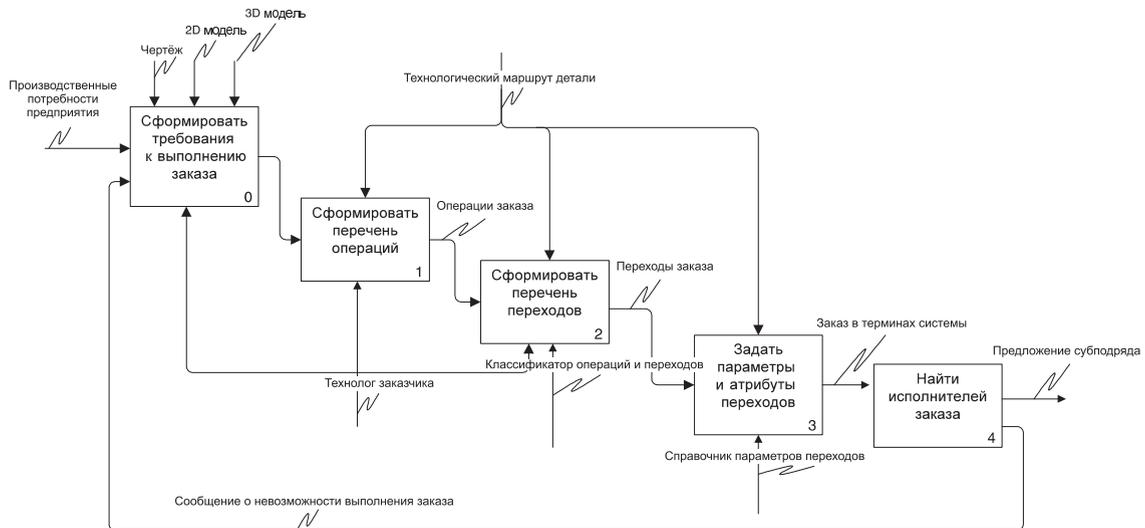


Рис. 2. Процесс формирования четырехуровневого описания технологического процесса

строения и приборостроения» [1], содержит описание переходов, включающее название, код (два символа обозначают действия, три цифры кода – предметы труда), тип, вид операции и вид обработки, к которым принадлежит данный переход. Переходы группируются в операции. Описание технологических операций соответствует «Классификатору технологических операций машиностроения и приборостроения» [2]. Операция содержит название и четырехзначный код операции (по классификатору). Операции объединяются в группы операций (по первым двум цифрам кода).

Каждый переход соответствует операции, описывается названием, кодом и конечным вектором параметров, которые содержат характеристики его выполнения. Параметры перехода – значения, диапазоны значений или списки значений для описания возможностей оборудования составляются в форме определения предельно достижимого качества выполнения перехода. Параметры перехода содержат сведения о переменных параметрах норм времени и точности обработки на технологическом оборудовании (например, величину припуска, число ходов, скорость обработки, машинное время). Так, например, переходу «Вырезать отверстие», относящемуся к виду операций «Обработка резанием», соответствует код ЖН 730. Переход закрепляется за операциями 4261, 4237, 7512, 7519, 7525 («Комплексная обработка на обрабатывающих центрах с ЧПУ», «Вертикально-фрезерная обработка» и т. д.), содержит два параметра: «Диаметр» (задается интервалом, ограниченными числами с плавающей точкой, измеряется в миллиметрах) и «Точность

диаметра» (задается целым числом, единица измерения – «калитет»).

Классификатор переходов позволяет группировать переходы по набору атрибутов перехода и их значений, а также по типу перехода. Любой переход может быть закреплен за конкретной моделью станка. Атрибутами перехода называется группа параметров, позволяющих описать основные характеристики оборудования, на котором выполняется переход (габаритные размеры рабочей области, число степеней свободы механизмов передачи движения, перечень сменного инструмента и т. д.). Для более точного описания технологических возможностей оборудования, атрибуты перехода объединяются в группы (пример группы: наибольшая ширина стола, наибольшая высота стола, наибольшая масса заготовки).

Необходимость описания технологического процесса на уровне инструментальных переходов (глубже уровня операций) вызвана следующими ограничениями:

классификаторы операций и переходов требуют отнести станок, выполняющий разные операции, к группе «операции с ЧПУ», при этом отдельные операции (токарная, фрезерная и т. д.) будут рассматриваться как инструментальные переходы данного станка. Эта особенность усложнит описание технологического процесса при составлении заказа и усложнит механизм поиска;

в описание параметров операции необходимо заносить самые грубые значения для всех инструментальных переходов (наименьшая точность и т. д.), что не позволит осуществить поиск по предельным значениям параметров.

Для описания оборудования выделяется набор свойств: код модели, название модели, тип станка, группа станка, год выпуска станка, фирма-изготовитель. За каждой моделью закрепляется перечень операций и переходов, выполняемых на ней. К каждому переходу присоединяется набор параметров и набор значений. Связывание параметров осуществляется двумя способами: «от перехода» или «от станка». Оба способа являются равнозначными.

Двухуровневый классификатор оборудования, основанный на существующем классификаторе оборудования [3], позволяет группировать оборудование по группам и типам. Группа определяется основной операцией, выполняемой станком (например, токарная, фрезерная). Тип станка более точно описывает его особенности, например, токарно-револьверный, карусельный и т. д.

Перечень оборудования содержит данные о модельном ряде оборудования, описывает оборудование и особенности технологических переходов конкретных моделей в соответствии с паспортными данными оборудования. Перечень оборудования используется предприятиями для описания собственного станочного парка. Для этого данные об оборудовании, включающие описание модели, а также набор операций и переходов (со значениями параметров и атрибутов), копируются в описание станочного парка предприятия. Технологи предприятия могут объединять оборудование в группы (для исключения повторного описания одинаковых экземпляров оборудования), корректировать значения параметров и атрибутов переходов оборудования в соответствии с актуальными значениями своих экземпляров. Значения могут меняться из-за износа или модернизации оборудования.

Оборудование одной модели может быть объединено в группы по характеристикам технологических возможностей, что позволяет избежать индивидуального описания каждого экземпляра оборудования. Каждой группе оборудования присваивается свой набор параметров; перечень параметров фиксирован. Значения параметров копируются из словаря и могут быть откорректированы специалистами предприятия, например, из-за модернизации или амортизации оборудования; при этом перечень параметров остается неизменным.

#### **Функциональное обеспечение модуля технологических возможностей**

Управление данными РСТПП обеспечивается набором функций, сгруппированных в шесть под-

систем: управление технологическими операциями; управление классификатором оборудования; управление данными предприятия; управление заказами; поиск заказа; управление правами доступа.

Функция *Управление технологическими операциями* обеспечивает:

- управление операциями (просмотр, удаление, добавление, изменение и корректировка двухуровневого классификатора технологических операций);

- управление технологическими переходами; формирование списка параметров переходов для каждого технологического перехода.

Функция *Управление классификатором оборудования* обеспечивает:

- управление классификатором станков (ведение двухуровневого классификатора станков: группа станков и тип станка);

- управление перечнем станков (перечень моделей оборудования).

Функция *Управление данными предприятия* обеспечивает:

- управление списком предприятий. Каждое предприятие описывается формой собственности, названием, адресом, номером телефона, электронной почтой, текстовым описанием;

- управление перечнем оборудования предприятия. Оборудование выбирается из ранее сформированного словаря системы;

- управление группами оборудования предприятия; просмотр переходов оборудования, каждой модели оборудования добавляется фиксированный перечень переходов.

Функция *Управление заказами* обеспечивает:

- управление перечнем заказов. Заказ может быть уточнен дополнительными документами: описание технологического процесса, трехмерная модель детали (по желанию заказчика), чертеж детали;

- ввод заказа. Заказ вводится в два этапа: формирование текстовой части и формальное задание переходов с ключевыми значениями атрибутов и параметров. Формирование текстовой части состоит в выборе операций из классификатора операций и в приписывании к ней неформализованной текстовой части. Этап формализации переходов состоит в выборе переходов конкретной операции из классификатора переходов и заполнении значений параметров каждого перехода.

Функция *Поиск исполнителей заказа* обеспечивает:

выбор вариантов реализации заказа, включающих в себя наименьшее число участников. Результат поиска может быть расширен за счет перечня моделей, обеспечивающих выполнение заказа на конкретном предприятии;

выбор вариантов реализации заданного перехода.

Результатом поиска является список вариантов реализации заказа на предприятиях с указанием моделей станков, либо описание причин невозможности выполнения заказа.

*Управление правами доступа.* Система поддерживает управление доступом на основе ролей. Роль является совокупностью прав доступа на объекты информационной системы. Система управления правами доступа (СУПД) позволяет организовать доступ к объектам разрабатываемой системы в соответствии с полномочиями пользователей. Функциональность СУПД обеспечивает задание прав пользователей с любой степенью подробности. Для каждого объекта системы определены права на создание, просмотр, изменение и удаление данных. СУПД базируется на понятиях «пользователь» и «роль». Каждому пользователю присваивается единственная роль. СУПД разграничивает доступ пользователей в системы на двух уровнях: серверном и интерфейсном.

На серверном уровне СУПД позволяет управлять доступом пользователей к БД системы. Пользователи системы получают только те права на таблицы данных и функции, на которые для них настроен доступ. Настройку таблиц данных и функций выполняет администратор системы средствами СУБД. Разграничение доступа на интерфейсном уровне позволяет управлять доступом к пунктам меню системы, к функциям и формам на уровнях просмотра и редактирования данных.

Кроме этого, СУПД осуществляет регистрацию всех действий пользователя в рамках системы (аудит) и предоставляет удобную систему отчетности. Эти возможности обеспечивают

средства ведения истории изменений данных в системе, осуществляющие оперативный контроль корректности работы пользователей.

В процессе разработки распределенной автоматизированной системы эффективной организации технологической подготовки машиностроительного производства, получены следующие результаты.

Установлено, что задача автоматизации поиска вариантов организации технологического процесса и подбора необходимого оборудования актуальна и в настоящее время не решена.

Сформулированы требования к распределенной интерактивной информационной системе для построения технологических решений в области механообработки, используя технологические возможности предприятий региона, что позволит сократить время построения технологических решений.

Разработана архитектура информационной системы, позволяющая взаимодействовать с пользователями без установки специального программного обеспечения, без дополнительных требований к аппаратной части.

Создана модель данных, позволяющая реализовать принцип открытости, что обеспечивает расширение информационной части системы за счет внесения данных о новом оборудовании и его возможностях.

Разработана программная реализация предложенных решений, которая успешно апробирована при создании электронной системы мониторинга ключевых технологических компетенций машиностроительных предприятий Северо-Западного региона.

Предлагаемые решения наиболее востребованы в таких наукоемких областях машиностроения, как робототехника, космонавтика, медицина, для которых применение новейших технологий является приоритетным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Классификатор технологических переходов машиностроения и приборостроения. 1 89 187 [Текст].—М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1991.—120 с.
2. Классификатор технологических операций в машиностроении и приборостроении: в 2-х ч. [Текст].—М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1975.—Ч.1.—24 с.; 1978.—Ч.2.—32 с.
3. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов. [Текст]/Под ред. В.Э. Пуша.—М.:

Машиностроение, 1985.—256 с.

4. **Советов, Б.Я.** Теория информационных процессов и систем: Учебник для студентов вузов [Текст]/ Б.Я. Советов [и др.]; Под редакцией Б.Я. Советова.—М.: Изд. центр «Академия», 2010.—432 с.

5. Методология функционального моделирования IDEF0. Руководящий документ. РД IDEF0 2000 [Текст].—М.: Госстандарт России. Изд-во стандартов, 2000.—75 с.

## НАВИГАЦИЯ ПО РАССТОЯНИЯМ ДО ТОЧЕЧНЫХ ОРИЕНТИРОВ АДАПТИВНЫМ МЕТОДОМ СУЩЕСТВЕННОЙ ВЫБОРКИ

Задача навигации по расстояниям до точечных ориентиров состоит в определении координат объекта (судна, мобильного робота) по результатам измерений расстояний до двух точечных ориентиров с известными координатами [4, 10]. Этими ориентирами могут служить маяки, характерные точки местности, искусственные и природные реперы, береговые знаки и др. Предполагается, что объект, координаты которого подлежат определению, располагает средством измерения расстояний до удаленных предметов, например, радиодальномером, лазерным дальномером или гидролокатором с соответствующими возможностями. Рассмотрим плоскую задачу, т. е. у объекта только две координаты. В случае точных измерений до двух точечных ориентиров эти координаты определяются однозначно как точка пересечения окружностей с центрами в ориентирах и радиусами, равными измеренным расстояниям. Однако на практике измерения зашумлены, т. е. имеют случайную погрешность. В рамках байесовского подхода [4–6] вместо точного определения координат объекта на плоскости имеем вероятностное распределение, при этом оптимальная байесовская оценка положения объекта определяется как математическое ожидание, соответствующее этому распределению. Прямое вычисление этой оценки подразумевает калькуляцию частного двух интегралов, которые, как правило, считаются приближенно.

В статье описано применение адаптивного метода существенной выборки [1–3] к вычислению интегралов, входящих в формулу для оптимальной байесовской оценки, и проведено сравнение результатов с вычислениями по схеме, применяемой для расчета апостериорных средних в методе important sampling [6, 9], являющемся одним

из основных последовательных методов Монте-Карло (Sequential Monte Carlo Methods). Численные примеры свидетельствуют о преимуществах предлагаемого адаптивного метода.

### Постановка задачи

Наша цель – определить координаты объекта  $(x_1, x_2)$  по известным результатам измерений расстояний до двух точечных неподвижных ориентиров, координаты которых  $(x_1^1, x_2^1)$  и  $(x_1^2, x_2^2)$  предполагаются известными. Предположим, что сделано  $m$  пар измерений из одного положения (по одному измерению для каждого ориентира в каждой паре). Вводя измерительные шумы, обозначим результаты этих измерений как

$$y_i^1 = \sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2} + v_i^1;$$
$$y_i^2 = \sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2} + v_i^2; \quad (i = \overline{1, m}).$$

Ошибки измерений предполагаем одинаково распределенными, гауссовскими, независимыми и центрированными, т. е.  $v_i^k \sim \mathbf{N}(0, r)$ ,  $(i = \overline{1, m}; k = \overline{1, 2})$ . Здесь  $\mathbf{N}(0, r)$  обозначает нормальное распределение на прямой с центром в нуле и дисперсией  $r^2$ . В рамках байесовского подхода мы должны задать некоторое априорное распределение положения объекта на плоскости, в данной статье оно задается функцией  $p(x_1, x_2) = \mathbf{N}(x_1, x_2, x_1^0, x_2^0, \sigma_1, \sigma_2, 0)$ , где  $\mathbf{N}(x_1, x_2, x_1^0, x_2^0, \sigma_1, \sigma_2, 0)$  обозначает нормальное распределение на плоскости с независимыми компонентами, распределениями которых являются  $\mathbf{N}(x_1^0, \sigma_1)$  и  $\mathbf{N}(x_2^0, \sigma_2)$ . Апостериорная плотность распределения вектора  $(x_1, x_2)$  при условии известных результатов серии измерений  $y_i^1$  и  $y_i^2$  ( $i = \overline{1, m}$ ) задается формулой

$$p(x_1, x_2 | y_i^1; y_i^2) =$$

$$= C p(x_1, x_2) \prod_{k=1}^m \mathbf{N} \left( y_k^1, \sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2}, r \right) \times$$

$$\times \mathbf{N} \left( y_k^2, \sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2}, r \right),$$

где  $\mathbf{N} \left( y_k^s, \sqrt{(x_1 - x_1^s)^2 + (x_2 - x_2^s)^2}, r \right)$  обозначает

$$\hat{x}_1 = \frac{\iint p(x_1, x_2) \prod_{k=1}^m \mathbf{N} \left( y_k^1, \sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2}, r \right) \mathbf{N} \left( y_k^2, \sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2}, r \right) dx_1 dx_2}{\iint p(x_1, x_2) \prod_{k=1}^m \mathbf{N} \left( y_k^1, \sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2}, r \right) \mathbf{N} \left( y_k^2, \sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2}, r \right) dx_1 dx_2}; \quad (1)$$

$$\hat{x}_2 = \frac{\iint p(x_1, x_2) \prod_{k=1}^m \mathbf{N} \left( y_k^1, \sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2}, r \right) \mathbf{N} \left( y_k^2, \sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2}, r \right) dx_1 dx_2}{\iint p(x_1, x_2) \prod_{k=1}^m \mathbf{N} \left( y_k^1, \sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2}, r \right) \mathbf{N} \left( y_k^2, \sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2}, r \right) dx_1 dx_2}. \quad (2)$$

К приближенному вычислению частных (1) и (2) и применялся адаптивный метод существенной выборки (АСВ), об особенностях применения которого к данной задаче рассказано ниже.

#### Схема применения АСВ к вычислению оптимальной оценки положения объекта

Рассмотрим применение АСВ к вычислению оценки первой координаты объекта, определенной формулой (1). Для краткости обозначим  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ ,  $\mathbf{x} \in R^2$ , и рассмотрим функции этого векторного аргумента:

$$f_1(\mathbf{x}) = x_1 p(x_1, x_2) \prod_{k=1}^m \times$$

$$\times \mathbf{N} \left( y_k^1, \sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2}, r \right) \times \quad (3)$$

$$\times \mathbf{N} \left( y_k^2, \sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2}, r \right) dx_1 dx_2;$$

$$f_2(\mathbf{x}) = p(x_1, x_2) \prod_{k=1}^m \times$$

$$\times \mathbf{N} \left( y_k^1, \sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2}, r \right) \times \quad (4)$$

$$\times \mathbf{N} \left( y_k^2, \sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2}, r \right) dx_1 dx_2.$$

В этих обозначениях формула (1) переписывается следующим образом:

$$\hat{x}_1 = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\int_{R^2} f_1(\mathbf{x}) d\mathbf{x}}{\int_{R^2} f_2(\mathbf{x}) d\mathbf{x}}. \quad (5)$$

значение функции плотности распределения нормального закона  $\mathbf{N} \left( \sqrt{(x_1 - x_1^s)^2 + (x_2 - x_2^s)^2}, r \right)$  в точке  $y_k^s$ , ( $k = \overline{1, m}$   $s = \overline{1, 2}$ ), а  $C$  – нормирующий множитель. Отсюда имеем формулы для оптимальных байесовских оценок  $\hat{x}_1$  и  $\hat{x}_2$  координат объекта:

Здесь и далее символ  $d\mathbf{x}$  означает элементарный элемент площади на плоскости. Предположим, что статистическая оценка величины вычисляется с помощью метода Монте-Карло в виде  $\tilde{x}_1 = \frac{\tilde{I}_1}{\tilde{I}_2}$ , где  $\tilde{I}_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{f_1(\mathbf{x}_k)}{p(\mathbf{x}_k)}$  и  $\tilde{I}_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{f_2(\mathbf{x}_k)}{p(\mathbf{x}_k)}$ , а  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N$  – последовательность независимых случайных векторов в  $R^2$ , распределенных согласно некоторой функции плотности распределения вероятности  $p(\mathbf{x})$ . В соответствии с обобщенной центральной предельной теоремой (дельта-методом) [7, 8] можно считать, что распределение частного  $\hat{x}_1$  при достаточно больших  $N$  близко к нормальному распределению

$$\mathbf{N} \left( \tilde{x}_1, \tilde{x}_1 \sqrt{\frac{\sigma_{\tilde{I}_1}^2}{I_1^2} + \frac{\sigma_{\tilde{I}_2}^2}{I_2^2} - \frac{2 \text{cov}(\tilde{I}_1, \tilde{I}_2)}{I_1 I_2}} \right),$$

где  $\sigma_{\tilde{I}_1}$  и  $\sigma_{\tilde{I}_2}$  – среднеквадратические отклонения случайных величин  $\tilde{I}_1$  и  $\tilde{I}_2$ . Вводя обозначения  $\xi = \frac{f_1(\mathbf{x})}{p(\mathbf{x})}$  и  $\eta = \frac{f_2(\mathbf{x})}{p(\mathbf{x})}$ , где вектор  $\mathbf{x}$  распределен с ф.п.р.в.  $p(\mathbf{x})$ , можно доказать, что

$$\text{cov}(\tilde{I}_1, \tilde{I}_2) = \frac{M\{\xi\eta\} - M\xi M\eta}{N} = \frac{\text{cov}(\xi, \eta)}{N}, \quad (6)$$

откуда имеем приближенное распределение для  $\tilde{x}_1$  вида  $\mathbf{N} \left( \tilde{x}_1, \tilde{x}_1 N^{-0.5} \sqrt{\frac{\sigma^2\{\xi\}}{I_1^2} + \frac{\sigma^2\{\eta\}}{I_2^2} - \frac{2 \text{cov}(\xi, \eta)}{I_1 I_2}} \right)$ .

Таким образом, для среднеквадратической ошибки  $\sigma\{\tilde{x}_1\}$  случайной величины  $\tilde{x}_1$  можем написать приближенное равенство:

$$\sigma\{\tilde{x}_1\} \approx \tilde{x}_1 N^{-0.5} \sqrt{\frac{\sigma^2\{\xi\}}{I_1^2} + \frac{\sigma^2\{\eta\}}{I_2^2} - \frac{2\text{cov}(\xi, \eta)}{I_1 I_2}}. \quad (7)$$

Чем меньше эта дисперсия, тем точнее величина  $\tilde{x}_1$  аппроксимирует искомую байесовскую оценку первой координаты объекта  $\hat{x}_1$ . Легко заметить, что при фиксированном  $N$  дисперсия  $\sigma\{\tilde{x}_1\}$  зависит от плотности  $p(\mathbf{x})$  не самым простым образом. Часто в задачах теории фильтрации, в частности, в методе important sampling в качестве  $p(\mathbf{x})$  берут априорную плотность распределения координат объекта, в данном случае это  $p(\mathbf{x}) = p(x_1, x_2) = \mathbf{n}(x_1, x_2, x_1^0, x_2^0, \sigma_1, \sigma_2, 0)$ . Такой выбор удобен для проведения дальнейшей процедуры оценивания координат объекта (как правило, движущегося) в режиме «on-line» в случае марковской модели [6]. В случае же измерений, проводимых из одного положения, такой выбор плотности  $p(\mathbf{x})$  не является оптимальным.

Ниже с помощью численного эксперимента доказано, что если плотность  $p(\mathbf{x})$  выбирать в соответствии с алгоритмом АСВ, то дисперсия, определяемая формулой (7), оказывается значительно меньшей, чем при вычислениях с априорной плотностью  $p(\mathbf{x})$ . Алгоритм АСВ (в сущности, последовательная бисекция) изложен в [1]. Отметим изменения по сравнению со схемой, приведенной в [1, 2].

Во-первых, «оптимальная» плотность ищется методом бисекций только для интеграла, стоящего в знаменателе частного (1). Таким образом, оптимальная плотность обслуживает сразу две координаты. Как альтернативу можно рассмотреть вариант, в котором плотность оптимизируется отдельно для числителей дробей (1) и (2) и для их общего знаменателя. Однако, как показала вычислительная практика, это, по-видимому, связано с алгоритмическими осложнениями, которые удлиняют время работы программы, не давая при этом заметного выигрыша в точности.

Во-вторых, метод использовался не в полном объеме: применялся только способ подбора оптимальной плотности, гарантирующий быстрое сгущение точек в областях наибольших значений модуля подынтегральной функции. После определенного количества итераций найденная плотность фиксировалась и более не переопределялась, чтобы избежать замедления вычислений, связанных с чрезмерно мелким дроблением области, и, как следствия, медленной генерации случайных векторов, распределенных с соответствующей кусочно-постоянной плотностью.

В-третьих, поскольку подынтегральные функции в (1) и (2) весьма близки к нулю на большинстве точек области определения и имеют резкие максимумы, то алгоритм бисекции применяется не к самим интегралам, а к их сдвигам вверх на некоторую положительную константу, так же как это делалось в при решении одномерной тестовой задачи навигации в [3]. Без этой «меры предосторожности», к сожалению, АСВ в случае близких к нулю функций с ненулевой вероятностью может генерировать непригодные для вычислений плотности. Видимо, сдвиг интегралов на константу не самый эффективный, хотя и простой способ избежать этих нежелательных явлений, однако альтернативный алгоритм пока находится в стадии разработки.

Наконец, в-четвертых, отметим, что кусочно-постоянная плотность строилась исходя из большого квадрата, включающего в себя область, в которой объект априорно находится с вероятностью, большей 0,9999, вне данного квадрата эта плотность доопределялась нулем, что не вело к практически значимой потере точности.

### Результаты численного эксперимента

Рассмотрим следующую навигационную задачу. Требуется найти оптимальную байесовскую оценку положения судна по результатам пяти пар измерений до двух маяков с известными координатами (3000; 0) и (0; 3000), единица измерения – метр. Результаты измерений представлены в виде векторов (2981, 2978, 2985, 3017, 2993) и (2969, 3002, 2977, 3021, 2995) для первого и второго ориентиров. Ошибки измерений предполагаем одинаково распределенными, гауссовскими, независимыми и центрированными, т. е.  $v_i^k \sim N(0, 30)$ ,  $i = 1, 5$ ,  $k = 1, 2$ . Априорная плотность распределения  $p(\mathbf{x})$  вектора координат судна  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$  предполагается гауссовской,  $p(\mathbf{x}) = N(\mathbf{x}, 0, 0, 100, 100, 0)$ . На рис. 1 изображена рассматриваемая ситуация: априори судно с вероятностью, большей 0,999 находится внутри окружности радиуса 400 м с центром в начале координат. По результатам измерений оно может находиться либо в районе точки М, либо в районе точки N. Однако вариант с точкой М практически невозможен, т. к. эта точка лежит вне указанной выше окружности. Следовательно, апостериорная плотность должна иметь острый максимум в районе точки N при практически нулевых значениях в остальных точках плоскости. На рис. 2 приведен график под-

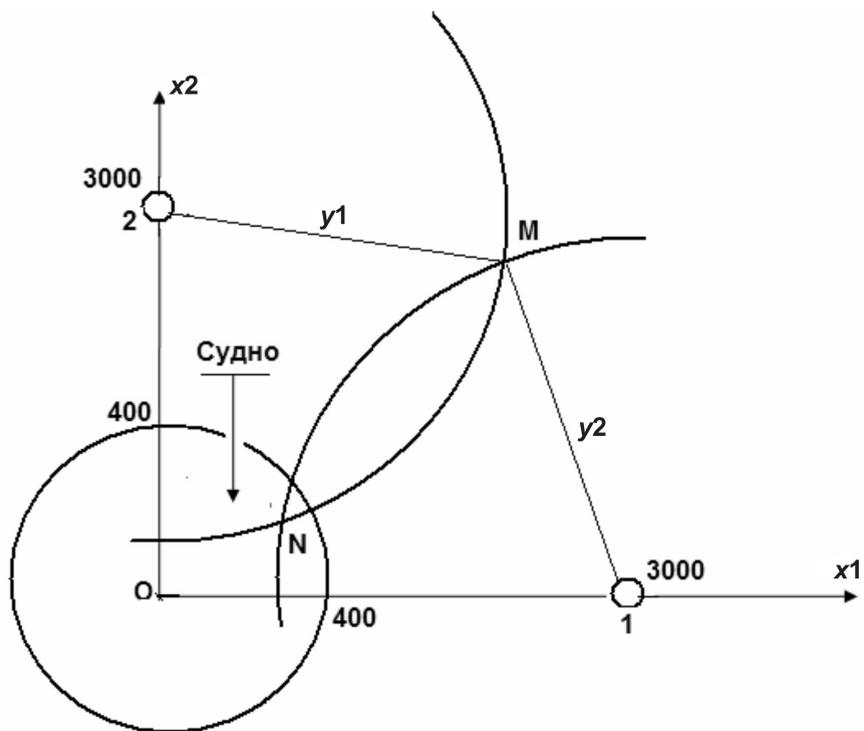


Рис. 1. Взаимное расположение судна и точечных ориентиров  $y_1$  и  $y_2$ —результаты измерений расстояний до первого и второго маяков

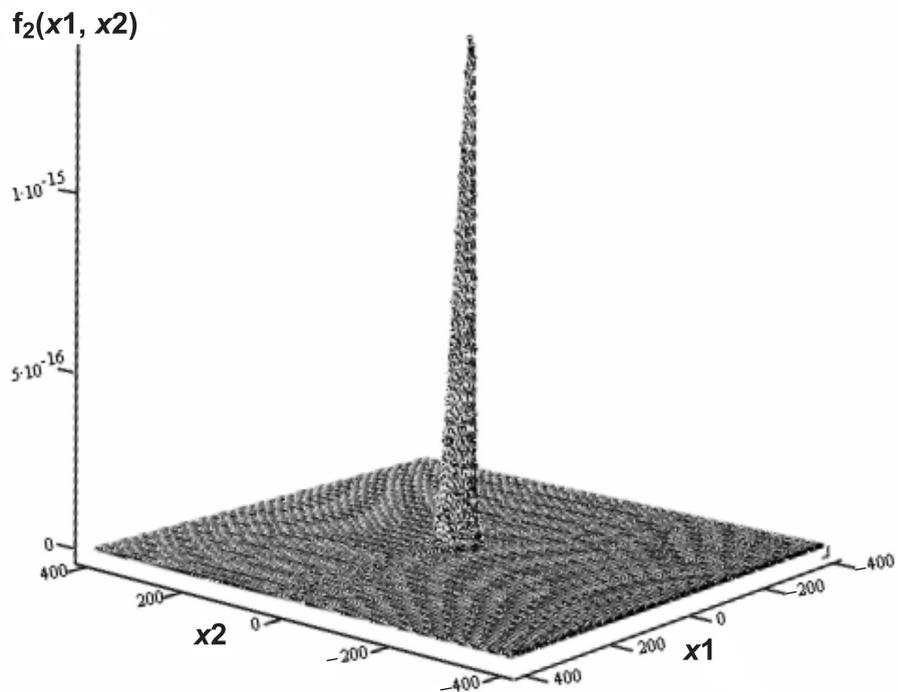


Рис. 2. График подынтегральной функции  $f_2(x)$

ынтегральной функции  $f_2(x)$  из формулы (4) применительно к данной задаче, эта функция пропорциональна апостериорной плотности. На графике хорошо виден острый максимум над точкой наиболее вероятного положения судна, определяемого по результатам измерений.

Для вычислений использовались два метода: АСВ и вариант метода Монте-Карло, в котором в качестве плотности распределения используется априорная плотность распределения координат судна. Этот метод выбран для сравнения, поскольку он используется для расчета искомой оценки в классической схеме *important sampling*, часто применяемой при решении навигационных задач. Для краткости назовем этот метод «МК\_Априор». Сравнение проводилось по величине

$$RE = \sigma\{\tilde{x}_1\} N^{0.5} \tilde{x}_1^{-1} = \sqrt{\frac{\sigma^2\{\xi\}}{I_1^2} + \frac{\sigma^2\{\eta\}}{I_2^2} - \frac{2\text{cov}(\xi, \eta)}{I_1 I_2}}, \quad (8)$$

которая при фиксированном числе итераций прямо пропорциональна относительной погрешности вычислений. Чем меньше  $RE$ , тем метод эффективнее. Входящие в подкоренное выражение (8) точные величины заменены их статистическими оценками. Вычисления проводились на доверительном уровне 95 % для каждой координаты, точность вычислений – 0,1 м для каждой координаты. Калькуляция останавливалась при условии, что оценки обеих координат находятся в преде-

**Сравнение методов оценивания**

Метод оценивания		МК_Априор	АСВ
Оценки координат судна	$\hat{x}_1$	9,06	9,06
	$\hat{x}_2$	7,03	7,07
Кол-во итераций		$1 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^5$
Показатель дисперсии $RE$	$\hat{x}_1$	5,53	1,76
	$\hat{x}_2$	7,21	2,29
Корреляция числителя и знаменателя	$\hat{x}_1$	0,7	0,25
	$\hat{x}_2$	0,6	0,18

лах заданной точности.

Отсюда легко вывести, что обе координаты находятся в пределах заданной точности с вероятностью, не меньшей 90 %. Для АСВ, ввиду его вероятностной природы, используются средние значения всех статистических показателей, входящих в (8), взятые по итогам 300 просчетов. Количество итераций для АСВ указано с учетом итераций, требуемых для генерации случайной кусочно-постоянной в квадрате  $K = [-400, 400] \times [-400, 400]$  плотности, количество шагов бисекции – 10000. В таблице приведены результаты численных экспериментов.

Анализируя результаты, видим что АСВ тратит приблизительно в 10 раз меньше ите-

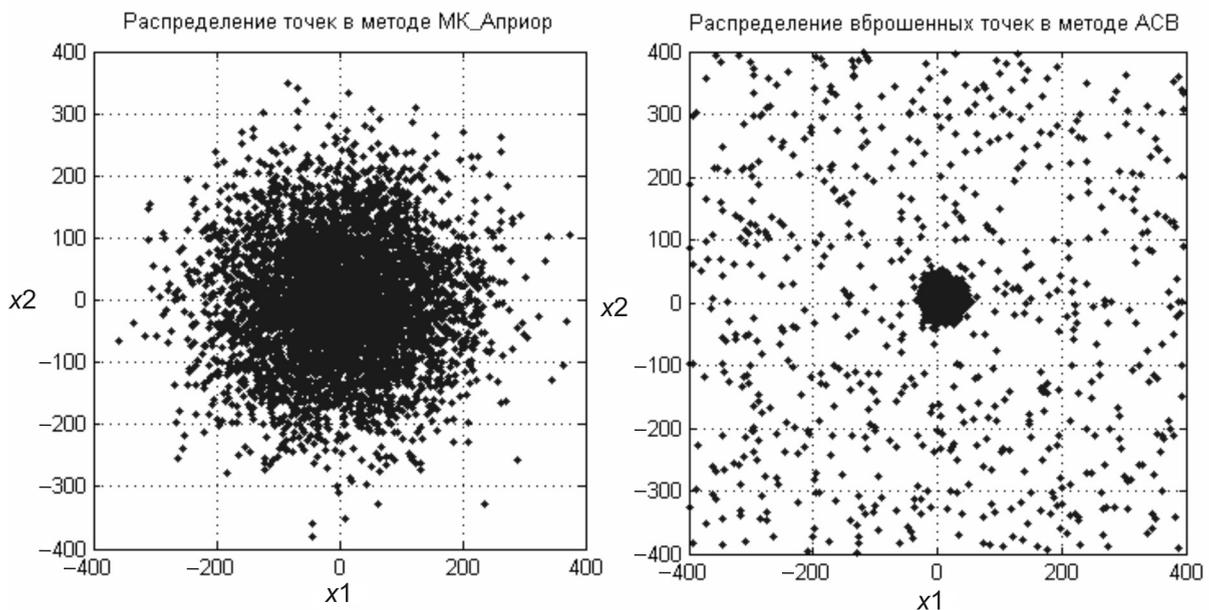


Рис. 3. Распределения 5000 точек, сгенерированных методами АСВ и МК\_Априор

раций, чем МК\_Априор, что подтверждается также сравнением соответствующих величин  $RE$ :  $(5,53/1,76)^2=9,87$  и  $(7,21/2,29)^2=9,91$ . Вместе с тем, видно, что метод МК\_Априор обеспечивает большую корреляцию между оценками числителя и знаменателя, чем АСВ, что благоприятно отражается на вычислениях, учитывая соотношение (8). Однако, вследствие уменьшения дисперсий числителя и знаменателя за счет хорошо подобранной плотности распределения генерируемых точек, метод АСВ все же имеет значительно меньшие показатели  $RE$ , чем метод МК\_Априор. На рис. 3. изображено распределение генерируемых точек для обоих методов.

На рис. 3 хорошо видно, что метод АСВ сгущает точки сильнее, причем именно в той относительно небольшой подобласти квадрата, где находится максимум апостериорной плотности.

Это обстоятельство и обеспечивает большую эффективность АСВ по сравнению с методом МК\_Априор.

В статье рассмотрено применение адаптивного метода существенной выборки к решению задачи навигации по расстояниям до точечных ориентиров. На конкретном численном примере проведено сравнение эффективности метода АСВ с вычислительным алгоритмом, обычно используемым в настоящее время для решения навигационных задач, показано преимущество АСВ в этом случае. Отмечена особенность применения АСВ к задачам байесовского оценивания: необходимость дополнительных усовершенствований в случае подынтегральных функций близких к нулю и применение дельта-метода для оценки погрешности частного.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арсеньев, Д.Г.** Адаптивное управление в стохастических методах вычислительной математики и механики [Текст]/Д.Г. Арсеньев, В.М. Иванов, М.Л. Корневский.—СПб.:Наука, 2008.—2-е изд., испр. и доп.—423 с.
2. **Арсеньев, Д.Г.** Анализ эффективности адаптивного метода существенной выборки [Текст]/Д.Г. Арсеньев, В.М. Иванов, Н.А. Берковский//Научно-технические ведомости СПбГПУ. —2009. —№ 4 (88). —С. 43–50.
3. **Арсеньев, Д.Г.** Адаптивный метод существенной выборки при ограниченном числе шагов бисекционного процесса [Текст]/Д.Г. Арсеньев, В.М. Иванов, Н.А. Берковский//Научно-технические ведомости СПбГПУ.—2010.—№ 2—С. 59–68.
4. **Степанов, О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации [Текст]/О.А. Степанов//Ч. 1. Введение в теорию оценивания. —СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009.—496 с.
5. **Stepanov, O.A.** Investigation of Linear Optimal Estimator [Текст]/O.A. Stepanov, A.B. Toropov// Proc. of XVII World Congress. —Seoul, 6–11 July 2008. —P. 2750–2755.
6. **Doucet, A.** Sequential Monte-Carlo methods in practice [Текст]/A. Doucet., N. Freitas, N. Gordon. —N.Y. Shpringer-Verlag, 2001.—581p.
7. **Kong, A.** A note on Importance Sampling using Standardized Weights [Текст]/A. Kong//Technical report № 348.—Department of Statistics.—Chicago, Illinois: The University of Chicago. 60637.—1992.
8. **Geweke, J.** Bayesian inference in econometric models using Monte-Carlo integration [Текст]/J. Geweke// Econometrica.—1989.—Vol. 57.—№ 6.—P. 1317–1339.
9. **Bergman, N.** Recursive Bayesian estimation. Navigation and Tracking Applications [Текст]/N. Bergman// Linkoping Studies in Science and Technology. Dissertations, 579. —Linkoping, Sweden, 1999.
10. **Borenstein, J.** Mobile Robot Positioning & Sensors and Techniques [Текст]/J. Borenstein, H.R. Everett, L. Feng [et al.]/J. of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots.—1997.—Vol. 14.—№ 4.—P. 231–249.

УДК 681.3.06

Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Т.А. Карташева

## ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЫНКОВ БЛАГ И ДЕНЕГ

Современные условия функционирования экономики характеризуются высоким уровнем нестабильности рыночной среды хозяйствования, недостаточностью ресурсного обеспечения секторов экономики, высокой динамичностью процессов их взаимодействия в рыночных условиях [1]. Решение проблем повышения эффективности управления экономической системой усложняется противоречивостью процесса взаимодействия институтов рынка и государства [2, 3]. Особую важность в спектре проблем управления экономикой приобретает обеспечение аналитической поддержки принятия решений при управлении реализацией различных политик государственного макроэкономического регулирования. В этой связи актуальна проблема системного и динамического моделирования процесса функционирования макроэкономической системы (МЭС) в неравновесных рыночных условиях, которое составляет методологическую основу для разработки информационных систем поддержки принятия решений [1–6]. Вместе с тем, несмотря на большое количество работ в этом направлении, малоизученными остаются вопросы анализа динамики процессов функционирования МЭС с одновременным учетом ограниченных запасов и рыночных механизмов регулирования, сопровождающихся неравновесными состояниями макроэкономических рынков.

В рамках решения задачи разработки инструментальных средств для аналитической поддержки процессов управления МЭС проводятся исследования динамики управления МЭС в неравновесных условиях взаимодействия макроэкономических рынков благ и денег. В данной статье решаются задачи разработки когнитивной и динамических моделей макроэкономического кругооборота МЭС с учетом взаимодействия рынков благ и денег на основе созданного ранее комплекса динамических моделей макроэкономического кругооборота потоков с учетом ограниченных запасов секторов экономики и влияния рынка благ [7, 8].

Разработка когнитивной модели макроэкономического кругооборота МЭС выполняется на

основе принципа последовательного усложнения поточно-запасной модели путем включения в нее сначала рынка благ, регулирующего функционирование основного, системообразующего контура «производство-потребление», а затем – рынка денег, который оказывает воздействие на функционирование корректирующего контура «инвестиции-сбережения» [7]. Когнитивная модель включает в себя шесть концептов: четыре макроэкономических агента (МЭА), в роли которых выступают: реальный сектор (фирмы), сектор домохозяйств (население), секторы финансовых и государственных учреждений, а также макроэкономические рынки благ и денег (рис. 1). Связями являются финансовые потоки (сплошные линии); информационные сигналы о запасах и рыночных ценах (штриховые линии); материальные потоки (штрихпунктирные линии).

Спрос и предложение на макроэкономических рынках могут иметь как размерности потоков, так и запасов; при этом они должны быть соразмерными. Для рынка благ совокупный спрос  $Ad$  и совокупное предложение  $As$  являются потоковыми величинами, при этом совокупный спрос  $Ad$  является финансовым, а совокупное предложение  $As$  является встречным материальным потоком [7]. Функционирование рынка денег основано на взаимодействии спроса на деньги  $Md$  и предложения денег  $MS$  как запасных величин. В модели эти связи имеют информационный характер, как и в случае управления секторами экономики на основе информации о запасах, и изображены штриховыми линиями. Таким образом, «запасный» по своей природе рынок денег не является местом взаимодействия потоков, а предназначен только для формирования информации о состоянии этого рынка и последующей корректировки потоков на ее основе.

Принципы системного моделирования и исследования рынка денег состоят в следующем.

1. Рынок денег – это макроэкономический рынок, на котором осуществляется купля и продажа денег как специфического товара, формируется спрос на деньги  $Md$ , предложение денег  $MS$  и

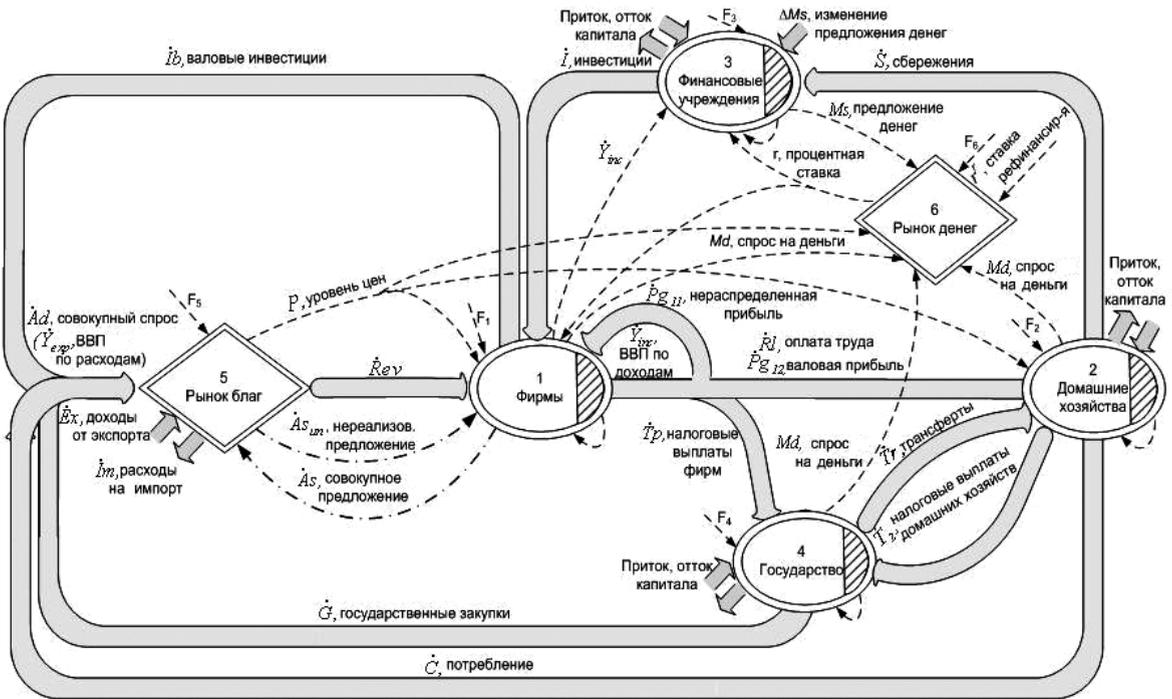


Рис. 1. Когнитивная модель функционирования МЭС с учетом рынков благ и денег

цена в виде ставки процента  $r$ . Моделирование и анализ закономерностей функционирования рынка денег ведется на основе кейнсианской теории процента и денег с учетом современных теорий рынка денег [1, 6].

2. *Спрос на деньги*  $Md$  представляет собой запас денег, который стремятся иметь в своем распоряжении экономические субъекты на определенный момент. Спрос на деньги формируют: население, которое осуществляет покупки товаров и услуг для личного потребления, предприятия, нуждающиеся в деньгах для инвестиций, и государство (см. рис. 1). Спрос на деньги, согласно кейнсианской концепции, определяется воздействием нескольких факторов. Во-первых, он зависит от производимого ВВП  $Y$ . Чем больше товаров и услуг производится в стране, тем большее количество денег необходимо (при заданной скорости их оборота) для обслуживания сделок. Это есть транзакционный мотив формирования спроса на деньги. Во-вторых, спрос на деньги зависит от стоимости их альтернативного использования – процентной ставки. Это соответствует спекулятивному мотиву спроса на деньги. С учетом сказанного совокупный спрос на деньги определяется по формуле:

$$Md = k_{my} \cdot \dot{Y}_{inc} - k_{md} * r, \quad (1)$$

где  $k_{my}$  – коэффициент, характеризующий эластичность спроса на деньги по доходу и показывающий на сколько условных единиц денежной массы увеличится спрос на деньги при увеличении темпа формирования совокупного дохода на одну единицу;  $k_{md}$  – коэффициент, характеризующий эластичность спроса на деньги по процентной ставке. Зависимость (1) интегрирует спрос на деньги со стороны всех МЭА и учитывает различные мотивы их поведения.

3. *Предложение денег*  $MS$  представляет собой денежную массу в обращении, т. е. совокупность платежных средств, обращающихся в стране на данный момент времени. Предложение денег в экономике осуществляет государство посредством банковской системы, включающей Центральный банк и коммерческие банки. Изменение предложения денег  $\Delta MS$ , связанное с денежной эмиссией, должно учитываться в динамической модели не только в виде информационной связи необходимой для определения процентной ставки, но и в виде потоковой, на основе которой выполняется корректировка запасов финансового сектора  $MS = MS^0 + \Delta MS$ , где  $MS^0$  – предложение денег в базовом году, соответствующем начальному времени моделирования (см. рис. 1).

4. Исследуется движение макроэкономиче-

ского рынка денег на множестве *неравновесных состояний*, при которых спрос на деньги не равен предложению денег, что предполагает взаимообусловленное изменение *процентной ставки*  $r$  как цены денег, спроса  $Md$  и предложения  $MS$  и имеет тенденцию движения в сторону равновесия за счет механизма самовыравнивания спроса и предложения. Динамика процесса изменения процентной ставки  $r$  при нарушении равновесия на рынке денег определяется чувствительностью  $k_{md}$  спроса на деньги  $Md$ . Чем больше коэффициент  $k_{md}$ , т. е. чем больше чувствительность спроса на деньги  $Md$ , тем меньше будет изменение процентной ставки, и тем быстрее рынок денег придет к новому состоянию. Предложение денег  $MS$  меняется только в результате принятия решений при реализации мер государственной монетарной политики.

5. Рынок денег выполняет роль механизма, с помощью которого государство воздействует на инвестиционный спрос  $Ib$  как компонент совокупного спроса  $Ad$ , принимая меры по денежно-кредитному регулированию экономики, например, в виде корректировки ставки рефинансирования  $r^0$  или предложения денег  $MS$ . Особенности реализации мер денежно-кредитного регулирования определяются особенностями взаимовлияния механизмов рынков благ и денег, которые согласно модели *IS-LM* связаны с действием стабилизирующего контура отрицательной обратной связи,

охватывающего эти рынки [1, 6].

Разработана *функциональная схема динамической модели МЭС с учетом рынков благ и денег* (рис. 2), на которой выделено шесть моделей, соответствующих концептам когнитивной модели. Сохранено обозначение всех связей.

Модель А1 предназначена для описания функционирования реального сектора экономики, который выполняет следующие функциональные процессы: производства ВВП с темпом  $\dot{Y}_{inc}$  на основе планируемых расходов  $\dot{Y}^0$ ; распределения ВВП  $\dot{Y}_{inc}$  на потоки с темпами формирования  $\dot{Rl}$  заработной платы и формирования налогов  $\dot{Tp}$  на производство и импорт и формирования валовой прибыли  $\dot{Pg}_{12}$ , выплаченной в виде доходов владельцам факторов производства; формирования совокупного предложения  $\dot{As}$  с учетом планируемых темпов использования товарно-материальных запасов (ТМЗ)  $\dot{Y}_{inv}^0$ ; формирования текущих инвестиционных расходов  $\dot{Ib}$  на основе использования собственных средств с планируемым темпом  $\dot{I}_{11}^0$  и заемных средств с темпом  $\dot{I}$ ; получения доходов по результатам обмена на рынке благ с темпом  $\dot{Rev}$  и пополнения ТМЗ с темпом  $\dot{As}_{un}$  в ситуациях избыточного предложения.

Отметим еще одну особенность модели А1 функционирования реального сектора, которая состоит в усложнении процесса планирования расходов в связи с возможностью реагирования на рыночные индикаторы. В модель введены дополнительные этапы

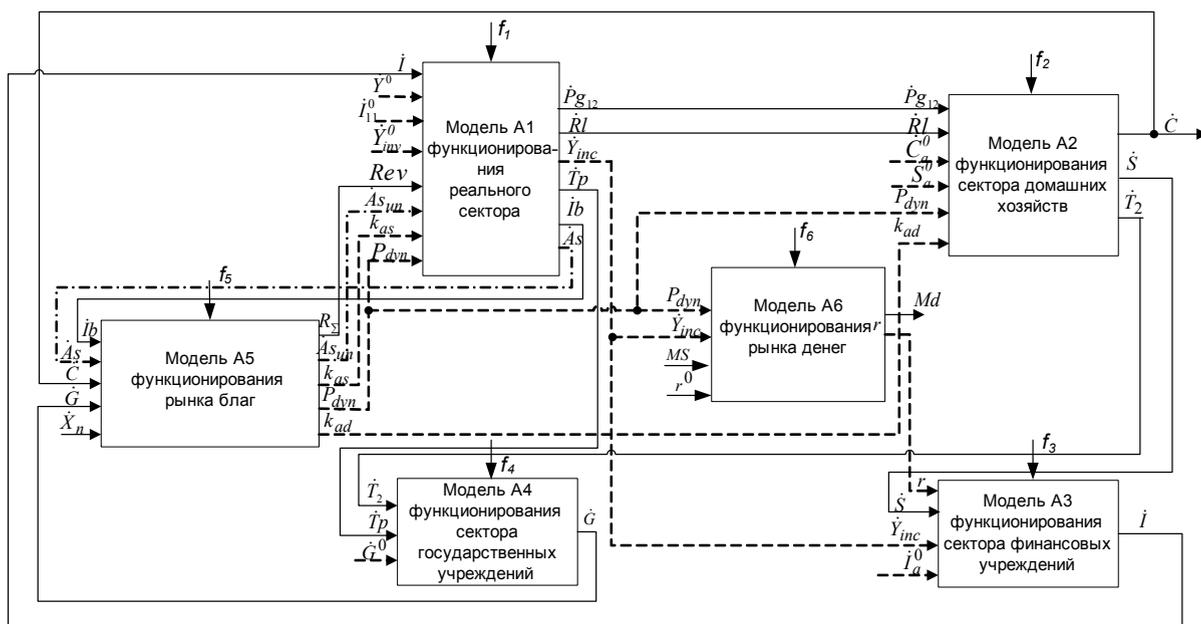


Рис. 2. Функциональная схема динамической модели МЭС с учетом рынков благ и денег

корректировки производственных планов, которые обратно пропорциональны динамической составляющей цены  $P_{dyn}$ .

Модель А2 описывает функционирование сектора домохозяйств, которые получают доходы в виде заработной платы  $\dot{R}l$  и части валовой прибыли  $\dot{P}g_{12}$ , формируют темпы потребления  $\dot{C}_1$ , сбережений  $\dot{S}$  и выплаты налогов  $\dot{T}_2$ . Планы по формированию расходов вычисляются согласно кейнсианской концепции на основе плановых темпов: автономного потребления  $\dot{C}_a^0$ , автономных сбережений  $\dot{S}_a^0$  для сектора домашних хозяйств. Особенности модели А2 состоят, во-первых, в дополнительной корректировке планов формирования расходов на потребление  $\dot{C}_a^0$  на основе информации о динамической составляющей цены  $P_{dyn}$ ; во-вторых, в корректировке фактических темпов расходов на потребление с помощью коэффициента  $k_{ad}$  необходимой в ситуациях дефицита.

Модель А3 предназначена для описания функционирования финансовых учреждений, в процессе которого на основе полученных доходов в виде сбережений  $\dot{S}$  и с учетом информации о планируемых автономных инвестициях  $\dot{I}_a$  формируются расходы в виде инвестиций  $\dot{I}$ , передаваемых реальному сектору. Особенностью модели А3 является учет влияния текущего дохода  $\dot{Y}_{inc}$  и текущей ставки процента  $r$  при формировании спроса на инвестиции  $\dot{I}$ .

Модель А4 описывает функционирование государственных учреждений, которые формируют доходы в виде налогов от реального сектора  $\dot{T}p$  и от домохозяйств  $\dot{T}_2$  и расходы в виде госзакупок  $\dot{G}$ .

Модель А5 предназначена для описания процесса функционирования рынка благ и предназначена, во-первых, для формирования текущего уровня цен  $P$  как суммы статической  $P^0$  и динамической составляющей  $P_{dyn}$ , и, во-вторых, для вычисления корректирующих коэффициентов  $k_{ad}$ , необходимого для определения фактических расходов на потребление, и  $k_{as}$ , необходимого для определения реализованных благ.

Модель А6 предназначена для описания процесса функционирования рынка денег на основе информации о текущем предложении денег  $MS$  с учетом текущего уровня цен  $P$ , и текущего дохода  $\dot{Y}_{inc}$ , оказывающего влияние на денежный спрос  $Md$ . Формирование текущей ставки процента  $r$  ориентировано на возможные изменения ставки рефинансирования  $r$ . Ставка процента  $r$ , в свою очередь, оказывает влияние на ожидания инвесторов и формирование ими планов инвестирования [8].

При построении динамической модели функ-

ционирования рынка денег (модель А6) принято, что ставка процента  $r$  рассматривается в виде суммы статической (базовой)  $r^0$  и динамической  $r_{dyn}$  составляющих:  $r = r^0 + r_{dyn}$ .

На денежном рынке существует целая система процентных ставок, среди которых особое место занимает ставка рефинансирования, устанавливаемая и регулируемая Центральным банком. Ставка рефинансирования по своему значению занимает промежуточное положение. С одной стороны, она превосходит ставку процента по депозитам и ставку процента по государственным облигациям. С другой стороны, ставка рефинансирования является основной для формирования межбанковских ставок процента и ставок процента по кредитам частному сектору, которые, в свою очередь, превосходят ставку рефинансирования. Статистические данные, размещаемые на сайтах Центрального банка и Министерства финансов, включают несколько видов ставок процента, рассчитанных как средневзвешенные величины [9]. Анализ статистических данных показывает, что все ставки процента, как правило, повторяют тенденцию изменения ставки рефинансирования, только каждая – на своем уровне. Исходя из сказанного, при моделировании в качестве статической составляющей ставки процента  $r^0$  принимается средневзвешенная кредитная ставка процента в базовом периоде. В модели существует возможность ее корректировки в процессе принятия решений по изменению ставки рефинансирования.

Динамическая составляющая  $r_{dyn}$  отражает изменения текущей ставки процента относительно базовой (статической)  $r^0$  в сторону увеличения или уменьшения и поэтому может иметь как положительный знак, так и отрицательный. Регулирующее влияние рыночной ставки процента на поведение МЭА, формирующей спрос на деньги, оказывает именно изменение ставки процента, а не ее абсолютный уровень. Поэтому в качестве информационной связи, регулирующей спрос на деньги, рассматривается динамическая составляющая ставки процента  $r_{dyn}$ .

Формирование динамической составляющей ставки процента  $r_{dyn}$  выполняется на основе функции П. Самуэльсона [6]:

$$\frac{d(r^0 + r_{dyn})}{dt} = k_r [Md(r_{dyn}) - Ms].$$

Зависимость спроса на деньги  $Md$  моделируется с учетом зависимости (1) по формуле:

$$Md(t) = Md^0 - k_{md} \cdot r_{dyn}(t) + \Delta Md_{nr}(t),$$

где присутствует спекулятивная составляющая ( $-k_{md} \cdot r$ ) спроса на деньги; транзакционная составляющая ( $k_{my} \cdot \dot{Y}$ ) относится к неценовым факторам  $\Delta Md_{nr}$  и может быть выделена в составе в качестве самостоятельной величины наряду с другими неценовыми факторами (например, в виде ситуации на рынке ценных бумаг);  $Md^0$  – базовое равновесное значение спроса на деньги.

Совокупное предложение в номинальном выражении  $MS$  формируется Центральным банком. Изменение предложения денег  $\Delta MS$  происходит в результате принятия решений в области денежно-кредитной политики. Такие решения относятся к более высокому уровню управления и поэтому в модели денежного рынка являются экзогенной величиной.

Необходимо отметить, что предложение, формируемое Центральным банком, является номинальным денежным запасом  $MS$ . Для приведения его в соответствие с переменными модели необходимо учесть изменяющийся во времени уровень цен  $P$  и вычислить реальное предложение денег по формуле:

$$Ms = \frac{MS}{P} = \frac{MS^0}{P} + \frac{\Delta MS_{nr}}{P} = Ms^0 + \Delta Ms_{nr},$$

где  $MS^0$  и  $Ms^0$  – базовые равновесные значения предложения денег в номинальном и реальном выражении соответственно;  $\Delta MS_{nr}$  и  $\Delta Ms_{nr}$  – изменения предложения денег, связанные с неценовыми факторами, в номинальном и реальном выражении соответственно.

Динамические особенности рынка денег должны учитываться при проведении денежно-кредитной политики. Например, при увеличении Центральным банком предложения денег с целью стимулирования инвестиций за счет снижения процентной ставки  $r$  скорость и величина реакции процентной ставки и динамика ее изменения определяются коэффициентом эластичности  $k_{md}$  спроса на деньги по процентной ставке. Если эластичность спроса на деньги высокая и предельители спроса на деньги значительно уменьшают спрос при снижении ставки процента  $r$ , то новое установившееся значение рыночной ставки процента будет несущественно отличаться от предыдущего. Таким образом, в условиях высокочастотного рынка денег для обеспечения желаемого снижения ставки процента требуется значительная денежная эмиссия. И, наоборот, в условиях

инерционного рынка такое же по значению снижение процентной ставки можно обеспечить за счет значительно меньшей по объему денежной эмиссии.

Роль рынка денег в рыночной экономической системе двойственна. С одной стороны, рынок денег очень чувствителен к изменению экономической конъюнктуры, и поэтому достаточно быстро реагирует изменением процентной ставки, которая через передаточный механизм денежной политики оказывает управляющее воздействие на совокупный спрос  $Ad$ . С другой стороны, рынок денег сам зачастую является причиной конъюнктурных колебаний, поскольку его участники быстро реагируют на информационные сигналы об изменениях в финансовой сфере [6].

Предложенные модели положены в основу экспериментальных исследований динамики процессов функционирования МЭС в неравновесных условиях взаимодействия рынков благ и денег. Исследования проводились с помощью системы имитационного моделирования и управления, которая предназначена для обеспечения аналитической поддержки специалистов в области макроэкономических исследований. На рис. 3 приведены результаты экспериментальных исследований по трем сценариям. В базовом (неуправляемом) сценарии 1 в момент времени  $t=14$  происходит изменение автономных инвестиций  $\Delta i_a^0 = -0,5$  вследствие неблагоприятных ожиданий инвесторов, что приводит к падению темпов формирования инвестиций  $\dot{I}$ , предоставляемых реальному сектору. Реальный сектор снижает инвестиционные вложения  $\dot{I}b$ , которые являются составляющей совокупного спроса  $\dot{A}d$ , и тем самым способствует его падению. На рынке благ возникает неравновесие между совокупным спросом  $\dot{A}d$  и совокупным предложением  $\dot{A}s$  ( $\dot{A}s > \dot{A}d$ ), что вызывает падение уровня цен  $P$  и рост ТМЗ  $\dot{Y}_{inv}$ . Сектор домохозяйств, воспользовавшись сложившейся на рынке благ ситуацией, увеличивает потребление  $\dot{C}$  за счет снижения своих запасов  $\dot{S}t_2$ . Однако, быстро израсходовав их, к моменту времени  $t = 36$  снижает потребление  $\dot{C}$ , что вызывает падение совокупного спроса  $\dot{A}d$ , а вслед за ним – и совокупного предложения  $\dot{A}s$ .

В управляемом сценарии 2 применяются управляющие воздействия в виде увеличения денежной массы  $\Delta MS = 1$  в момент времени  $t=17$  и увеличения темпа формирования собственных инвестиций  $\Delta \dot{i}_b = 0,4$  в момент времени  $t=18$ ,

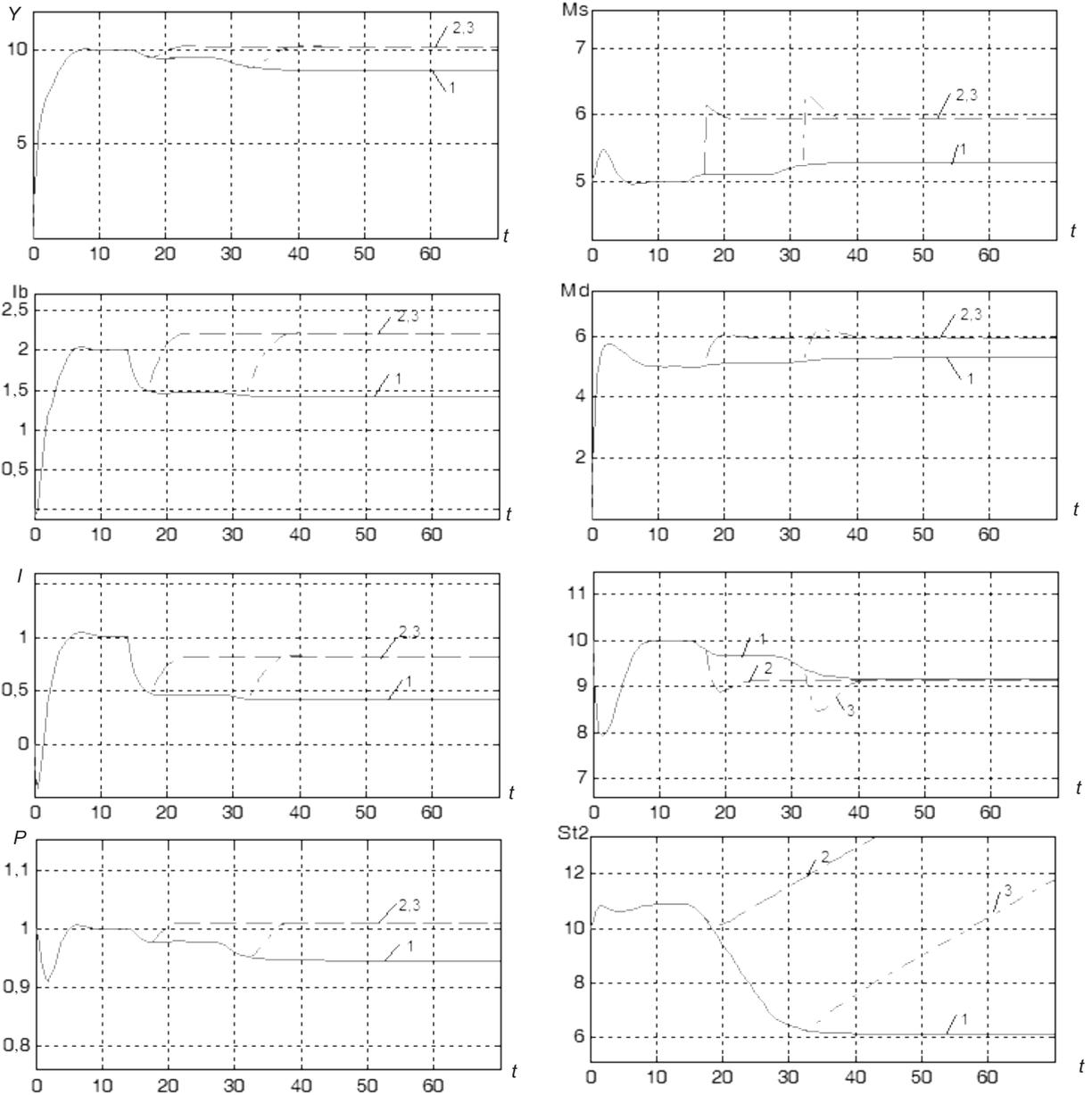


Рис. 3. Графики результатов экспериментов для неуправляемого и управляемых сценариев при реализации мер кредитно-денежной политики  
(—) – эксперимент без управления; (---), (- · - · -) – эксперименты с управлением

которые иллюстрируют проведение политики «дешевых» денег [6]. На рынке денег при этом наблюдается закономерное падение процентной ставки  $r$ , которое позволяет увеличить инвестиции  $I$ , предоставляемые сектором финансовых учреждений реальному сектору, который, в свою очередь, совместно с собственными инвестициями  $I_b$  увеличивает валовые инвестиции  $I_b$ , по-

зволяя не только полностью компенсировать падение темпа выпуска ВВП  $\dot{Y}$ , но и вывести МЭС на более высокий по сравнению с плановым уровень  $\dot{Y} = 10,09$ .

Управляемый сценарий 3 демонстрирует негативное влияние задержки в принятии тех же решений. Решения принимаются значительно позже, в момент  $t = 32$ , когда у сектора домохо-

зайств уже истощились запасы  $St_2$ , а, следовательно, и времени на его восстановление потребуется больше. Поэтому именно своевременное вмешательство Центрального банка и проведение активной кредитно-денежной политики позволяет избежать последствий в виде снижения запасов сектора домохозяйств  $St_2$  с последующим сокращением совокупного спроса  $Ad$  и непропорционального перераспределения запасов между секторами экономики, что в конечном счете позволяет предотвратить падение ВВП в долгосрочной перспективе.

Таким образом, разработана когнитивная модель функционирования МЭС с учетом рынков благ и денег, позволяющая, во-первых, определить роль рынка благ, состоящую в аккумулировании финансовых потоков потребления и накопления, а также в формировании уровня цен как информационного фактора, регулирующего процесс обмена благ и денег на динамически неравновесных

режимах, и, во-вторых, определить роль рынка денег, тесно взаимодействующего с рынком благ, состоящую в формировании ставки процента как информационного регулирующего фактора, воздействующего на инвестиционный спрос как самый динамичный компонент совокупного спроса.

Разработанная динамическая модель функционирования рынка денег в системе макроэкономического кругооборота позволяет описать сущность и динамические особенности взаимосвязанного изменения спроса на деньги и процентной ставки и исследовать особенности взаимодействия рынка денег и рынка благ.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что принимаемые решения позволяют обеспечить переход от неблагоприятных, динамически неравновесных рыночных ситуаций к более благоприятным ситуациям, соответствующим прежнему или новому уровню темпа выпуска ВВП за счет своевременного регулирования ситуаций на рынках благ и денег.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маневич, В.Е. Кейнсианская теория и российская экономика [Текст]/В.Е. Маневич.—М.: Наука, 2008.—221 с.
2. Кузык, Б.Н. Прогнозирование, стратегическое планирование и национальное программирование: Учебник [Текст]/Б.Н. Кузык, В.И. Кушлин, Ю.В. Яковец.—М.: Экономика.—2008.—2-е изд., перераб. и доп.—575с.
3. Якунин, В.И. Государственная экономическая политика России. К умной и нравственной экономике [Текст]/В.И. Якунин, В.Л. Макаров, В.Э. Багдасарян; Под ред. С.С. Сулакшина.—М.: Научный эксперт, 2007.
4. Петров, А.А. Математические модели экономики России [Текст]/А.А. Петров, И.Г. Поспелов// Вестник Российской академии наук.—2009.—Т. 79.—№6.—С. 492—506.
5. Бродский, Б.Е. Модели макроэкономического обмена: рынки благ и ресурсов. [Электронный ресурс]/Б.Е. Бродский//Центр ситуационного анализа и прогнозирования ЦЭМИ РАН. Теория и методология. Институциональная экономика, 2008.—<<http://www.cemi.rssi.ru> (05.12.2010)
6. Макроэкономика: Учебник [Текст]/Л.С. Тарасевич, П.И. Гребенников, А.И. Леусский.—М.: Высш. образование, Юрайт—Издат.—2009.—7-е изд. испр. и доп.—654 с.
7. 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.
8. Ильясов, Б.Г. Динамическая модель формирования процентной ставки как регулятора финансовых потоков макроэкономической системы [Текст]/Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Т.А. Карташева//Междунар. науч.-практ. конф. Системный анализ в проектировании и управлении, СПбГПУ.—2010.—С.35—40.
9. Основные экономические показатели [Электронный ресурс]//Информационно-аналитические материалы Центрального Банка России, 2010.—<[http://www.cbr.ru/statistics/print.aspx?file=macro/macro\\_10.htm](http://www.cbr.ru/statistics/print.aspx?file=macro/macro_10.htm)> (01.11.2010)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ ПРИ РЕШЕНИИ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

Кинематографические системы – совокупность организаций, учреждений и предприятий (элементов системы) различных форм собственности, а также отношений между этими элементами, предназначенная для выполнения одной итоговой цели: предоставления зрителю качественного и комфортного киноvideопоказа.

С точки зрения совокупности используемых методов и критериев управления кинематографические системы необходимо рассматривать в виде двух самостоятельных взаимосвязанных подсистем, управляющей и управляемой:

в управляющую подсистему входят элементы, обеспечивающие процесс управления, в частности, такой важнейший элемент, как организационная структура управления;

в управляемую подсистему входят предприятия и организации, обеспечивающие процессы создания материальных объектов (процессы производства киноvideотехники, киноvideопродукции) и оказания услуг (по кинопоказу, по техническому обслуживанию и эксплуатации киноvideотехники, по подготовке специалистов и повышению их квалификации).

Связь между управляющей и управляемой системами осуществляется с помощью информации, которая служит основой для выработки управленческих решений.

Проблеме формирования управляющей подсистемы кинематографии – организационной структуре управления – посвящен ряд фундаментальных работ [1], в которых рассматриваются концептуальные проблемы и механизмы управления и регулирования отрасли как одним из элементов социально-культурной сферы.

При разработке методов, критериев и алгоритмов управления управляемой подсистемой кинематографии необходимо учитывать следующие особенности:

кинематографические системы в настоящее время характеризуются кардинальным изменением их функциональных возможностей, что, несомненно, способствует повышению их со-

циальной значимости. Эти изменения основаны на инновационных технологиях эксплуатации и сервисного обслуживания киноvideотехники, на формировании новой элементной структуры процессов кинематографа в результате появления цифровых носителей информации и разработки новых принципов построения киноvideотехники (в настоящее время – мультимедийной техники). Новые функциональные возможности не только повышают требования зрителя, но также способствуют появлению совершенно новых требований к киноvideотехнике, связанных с качеством изображения и звука, а также с функциональными характеристиками как киноvideотехники, так и услуг по кинопоказу;

компоненты управляемой подсистемы – предприятия и организации кинематографии – также являются сложными системами, представляющими собой совокупность взаимосвязанных элементов: производственных и внепроизводственных процессов, составляющих деятельность организации; информационных документов, создаваемых и обрабатываемых организацией; взаимосвязанных звеньев организационной структуры; элементов инфраструктуры, т. е. с точки зрения разработки методов и алгоритмов управления в организационных структурах предприятий и организаций целесообразно выделять подсистемы более низкого уровня – исследовательские, маркетинговые, проектирования, производственные, эксплуатационные, метрологические, квалиметрические и др.

В связи с этим, основным аспектом управления кинематографическими системами является гарантированное использование возможностей обеспечения нового уровня качества киноvideообслуживания, предоставляемого технологиями цифрового кинематографа. Решение этой проблемы может быть основано только на системном подходе к оценке качества киноvideотехники, качества услуг, к оценке состояния производственных и внепроизводственных процессов и предполагает использование методов техниче-

ского регулирования, реализуемых в рамках закона «О техническом регулировании», поэтому проблемы стандартизации, метрологии, сертификации с точки зрения современных нормативно-технических, методических как отечественных, так и международных подходов, не могут быть решены без учета разработки и внедрения таких организационных структур, как системы менеджмента качества на кинематографических предприятиях и в организациях отрасли.

Требования к киноvideотехнике по отдельным квалиметрическим характеристикам и к услугам по кинопоказу по выходным квалиметрическим характеристикам формируются в результате стандартизации параметров кинематографических систем. Оценка степени достижения требуемых результатов преобразований обусловлена возможностью получения достоверных результатов измерений и контроля, т. е. метрологическим аспектом технического регулирования. Методики сертификации продукции, услуг, систем качества, аккредитация испытательных лабораторий должны позволять получать документальное подтверждение соответствия фактических значений характеристик установленным требованиям.

Поэтому управление компонентами управляемой подсистемы социальной кинематографической системы предполагает анализ и оценку ее выходных квалиметрических характеристик.

Использование комплексных или интегральных квалиметрических критериев, т. е. решение задач квалиметрического синтеза в кинематографии, позволяет оценивать киноvideотехнику, различные мультимедийные услуги с учетом совокупного влияния отдельных квалиметрических характеристик: ранжировать технику и услуги по уровню качества, присваивать им определенные градации (относить к определенному классу по уровню качества), решать практические задачи в рамках стандартизации и сертификации, формировать такие организационные структуры предприятий и организаций кинематографии, как системы качества, проводить их последующую сертификацию.

Формирование интегрального квалиметрического критерия – расчетная задача, поскольку ее решение и точность оценки определяются выбором метода свертывания единичных характеристик (параметров, показателей). Интегральный критерий позволяет связывать набор лингвисти-

ческих переменных на входе оцениваемого объекта (изделия, услуги, системы) с одной выходной лингвистической переменной, т. е. формировать интегральную оценку по набору входных лингвистических переменных.

Анализ проблемы *интегральных критериев для оценки результатов функциональных квалиметрических экспертиз* в кинематографических системах показывает отсутствие критериев, в основе которых лежат теоретически или экспериментально обоснованные зависимости [2–5]:

- технико-экономические показатели, основанные на сопоставлении полезного суммарного эффекта и суммарных затрат на создание, эксплуатацию и потребление  $K_k = \frac{Q}{S(t)\varphi(t) + K_0}$ , где  $Q$  – материальный полезный эффект от изделия;  $S(t)$  – эксплуатационные затраты;  $\varphi(t)$  – коэффициент интенсивности изменения затрат;  $K_0$  – капитальные затраты; поскольку эти показатели пригодны лишь для оценки качества изделий, эффект от эксплуатации которых может быть выражен в натуральной или денежной форме, такие критерии трудно применимы к решению квалиметрических задач в кинематографии;

- технико-экономические показатели, в которых полезный материальный эффект рассчитывается по отношению к эталонному (базовому) объекту

$$Q = K_{0\delta} \varphi(t) + S_{\delta}(t) + \sum_{i=1}^n \Delta Q_i + \sum_{j=1}^m \Delta Q_j,$$

где  $K_{0\delta}$ ,  $S_{\delta}(t)$  – капитальные и эксплуатационные затраты на базовый объект соответственно;  $n$  – количество характеристик оцениваемого объекта, отличающихся от характеристик базового объекта, которые могут быть оценены только экспертным методом, поэтому  $\Delta Q_i = \gamma_i Q_{\delta}$ ;  $Q_{\delta}$  – уровень качества базового объекта;  $m$  – количество подлежащих измерению показателей качества оцениваемого объекта, при этом отклонения показателей (характеристик) будут равны  $\Delta Q_j = \delta_j Q_{\delta} \frac{(P_j - P_{j\delta})}{P_{j\delta}}$ ;  $\gamma_i, \delta_j$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;  $P_j$  и  $P_{j\delta}$  – значения  $j$ -й характеристики оцениваемого и базового объектов; в кинематографических системах такие показатели целесообразны для квалиметрических оценок таких объектов, для которых не представляется возможным определить полезный материальный эффект: кинофотовидеоаппаратура, измерительные приборы;

• технико-экономический интегральный показатель [3], учитывающий влияние обобщенных показателей

$$Q = 0,7 \sum_{i=1}^{n_1} k_{1i} / n_1 + 0,2 \sum_{i=1}^{n_2} k_{2i} / n_2 + 0,1 \sum_{i=1}^{n_3} k_{3i} / n_3,$$

где первое слагаемое определяет влияние на интегральное качество совокупности характеристик надежности (их количество –  $n_1$ ), второе – эргономичности и безопасности (их количество –  $n_2$ ), третье – эстетичности (их количество –  $n_3$ );  $k_{1i}$ ,  $k_{2i}$ ,  $k_{3i}$  – значения коэффициентов весомости показателей, влияющих на надежность, эргономичность и безопасность, эстетичность; цифры перед знаками сумм соответствуют коэффициентам весомости обобщенных показателей;

• интегральные критерии в виде средневзвешенных показателей, например, критерий, предложенный А.В. Гличевым,

$$K_j = K_j^0 \sum_{i=1}^n K_{ij} G_i,$$

где  $K_j^0$  – коэффициент сохранения эффективности характеристик  $j$ -го объекта;  $K_{ij} = (Q_i - q_i^{0p}) / (q_i^{0t} - q_i^{0p})$  – относительный показатель  $i$ -й характеристики;  $Q_i$ ;  $q_i^{0t}$ ;  $q_i^{0p}$  – абсолютное, эталонное, предельно допустимое значение  $i$ -й характеристики;  $G_i$  – коэффициент важности (весовой коэффициент)  $i$ -й характеристики;  $n$  – количество характеристик; данная модель является средневзвешенным арифметическим значением (аддитивной моделью), также возможно применение средневзвешенного геометрического значения (мультипликативной модели)

$K_j = \prod_{i=1}^n (K_{ij})^{G_i}$ ; возможно использование средневзвешенных гармонического или квадратического показателей;

• показатели, позволяющие оценить конкурентоспособность изделий, услуг, например,  $B = M_0 / M_{\Sigma}$ , где  $M_0$  – объем продаж оцениваемой продукции;  $M_{\Sigma}$  – общая емкость рынка данных конкурирующих товаров;  $M_{\Sigma} = M_0 + \sum_{i=1}^n M_i$ ;  $M_i$  – объемы продаж аналогов.

*Интегральные (мультимодальные) качественные критерии, позволяющие анализировать результаты психофизических качественных экспертиз, т. е. учитывать совокупное влияние частных характеристик изображения и звука на интегральное субъективное восприятие, как правило, также являются либо аддитивными средневзвешенными показателями, либо моделями, в*

основе которых используется полиномиальная аппроксимация, и не позволяют учесть особенностей интегрального субъективного оценивания (вероятностно-статистический характер параметров модели: случайный характер весового коэффициента, возможность обменных соотношений между отдельными параметрами) [6-7]:

• критерий, предложенный М.В. Антипиным для оценки качества телевизионного изображения  $Q = 1/3 \sum_{C,V,T} \prod_{i=1}^n A_i(x_i)$ , где  $A_i$  – значение сенсорной функции зрительного анализатора для параметра  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;  $C, V, T$  – совокупность параметров, характеризующих цветность и объемность изображения;  $T$  – совокупность параметров плоского черно-белого изображения, является мультипликативным для параметров одной группы и аддитивным для отдельных групп;

• мультипликативный интегральный критерий, предложенный И. Паздераком и М. Кепром для оценки качества телевизионного изображения  $P_{\text{общ}} = \prod_{i=1}^n P_i^{0,785}$  – степенной критерий,

$P_{\text{общ}} = 0,113 + \prod_{i=1}^n P_i$  – пропорциональный критерий,  $p_i$  – оценка  $i$ -го параметра в шкале отношений, также является средневзвешенным показателем;

• интегральный критерий качества телевизионного изображения системы ПАЛ по пяти искажениям  $P = B_0 + \sum_{i=1}^5 B_i x_i$ , где  $B_0$  – эталонное значение;  $B_i$  – эмпирический коэффициент;  $x_i$  – величина искажения  $i$ -го параметра ( $i = 1, \dots, 5$ ), изменяется пропорционально изменению каждого отдельного показателя);

• интегральный критерий, основанный на суммировании ухудшений, выраженных в импах (*impairment*) (авторы – Б. Просер, Дж. Аллнат, Н. Льюис)

$$P_{\text{общ}} = 1 / (1 + I_{\text{общ}}) = [1 + \sum_{i=1}^n (1/p_i - 1)]^{-1},$$

где  $I_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n I_i$ ;  $I_i = 1/p_i - 1$  – частное ухудшение, возникающее при искажении  $x_i$ ;  $p_i$  – субъективная интегральная оценка при каждом отдельном ухудшении;

• интегральные критерии, в основе которых используется полиномиальная аппроксимация [6];

• совершенствование программного обеспечения методов обработки экспериментальных результатов предоставляет возможность использования для формирования интегрального квалиметрического критерия нейросетевых методов анализа данных, в частности, метод нейронных сетей (*Neural Networks*). В этом случае расчетный интегральный критерий приобретает роль функции активации, обеспечивающей переход с нижнего уровня сети на более высокий. Нейрон сети, так же как и интегральный критерий, являющийся результатом влияния обобщенных характеристик, получает входные сигналы через несколько входных каналов, каждый входной сигнал проходит через соединение, имеющее определенную интенсивность (или вес), этот вес соответствует «синаптической активности» нейрона. Вычисляется взвешенная сумма входов, из нее вычитается пороговое значение, в результате получается величина активации нейрона (она также называется *пост-синаптическим потенциалом нейрона* или *постсинаптической потенциальной функцией, PSP*).

Выбор интегрального квалиметрического критерия является одним из основных вопросов при разработке методологии экспертной квалиметрии в кинематографии. Анализ широкого спектра квалиметрических задач, которые необходимо решать в кинематографических системах, показывает, что можно сформулировать ряд требований к расчетному интегральному квалиметрическому критерию [8]: в основе критерия должны лежать результаты вероятностно-статистического анализа результатов квалиметрических экспертиз вне зависимости от класса используемой экспертизы, причем, желательно, чтобы параметры критерия могли быть определены в результате единой квалиметрической экспертизы; критерий должен быть удобным для использования на различных иерархических уровнях структуры квалиметрических характеристик.

В большей степени этим требованиям отвечает статистическая функция, описываемая характеристическими функциями, на основе которой формируется интегральный показатель, в теории случайных процессов аналогичный критерий используется для оценки результатов преобразований сигналов [9, 10]:

$$Q(\Delta q) = e^{i\bar{k}\Delta q - \Delta q^2 \sigma^2 / 2} = e^{i\bar{k}\Delta q} e^{-\Delta q^2 \sigma^2 / 2}.$$

Для практических квалиметрических задач

представляет интерес интегродифференциальный показатель, сформированный на основе действительной части функции:

$$\text{Re } Q(\Delta q) = \text{Cos}^2(\bar{k} \Delta q) e^{-\Delta q^2 \sigma^2 / 2}.$$

Приведенные выше рассуждения относятся к одномерному случаю, когда рассматривается влияние только одной  $i$ -й частной квалиметрической характеристики (технического параметра, фактора)  $q_i$  на интегральную оценку качества.

Для многомерного случая, когда обобщенные характеристики  $q_i$  независимы друг от друга, характеристическая функция будет представлять собой Фурье-преобразование произведения дифференциальных функций распределения вероятности случайных величин [11] (весовых коэффициентов обобщенных характеристик):

$$f(k_1, k_2, \dots, k_n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \prod_{i=1}^n \sigma_i}} e^{-\sum_{i=1}^n \frac{(k_i - \bar{k})^2}{2\sigma_i^2}},$$

где  $n$  – количество обобщенных субъективных квалиметрических характеристик;  $\bar{k}_i$  – среднее арифметическое значение коэффициента чувствительности к  $i$ -й характеристике;  $\sigma_i$  – среднеквадратическое отклонение коэффициента чувствительности к  $i$ -й характеристике.

Для зависимых между собой обобщенных квалиметрических характеристик  $n$ -мерная функция распределения вероятности будет равна

$$f(k_1, k_2, \dots, k_n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n D \prod_{i=1}^n \sigma_i}} e^{-\frac{1}{2D} \sum_{i=1}^n D_{i,i+1} \frac{(k_i - \bar{k}_i)(k_{i+1} - \bar{k}_{i+1})}{\sigma_i \sigma_{i+1}}},$$

где  $D$  – определитель  $n$ -го порядка

$$D = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & 1 \end{vmatrix},$$

$$r_{i,i+1} = r_{i+1,i}, r_{i,i+1} \leq 1, \quad r_{ii} = r_{i+1,i+1} = 1,$$

$D_{i,i+1}$  – алгебраическое дополнение элемента  $r_{i,i+1}$  в определителе  $D$ .

В этом случае математической моделью квалиметрической оценки может являться многомерная характеристическая функция суммарного (интегрального) воздействия обобщенных квалиметрических характеристик, вероятность

распределения весовых коэффициентов которых подчиняется нормальному распределению, на интегральную оценку качества анализируемой системы:

$$Q(\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n) = e^{j \sum_{i=1}^n \bar{k}_i \Delta q_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta q_i \Delta q_{i+1} \sigma_i \sigma_{i+1} r_{i,i+1}}$$

На основе действительной составляющей функции формируется интегродифференциальный показатель [12] (при этом первый сомножитель возводится в квадрат для того, чтобы показатель в практических расчетах принимал положительные значения):

$$Q = \text{Re } Q(\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n) = \cos^2 \left( \sum_{i=1}^n \bar{k}_i \Delta q_i \right) e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta q_i \Delta q_{i+1} \sigma_i \sigma_{i+1} r_{i,i+1}}$$

где  $\bar{k}_i$  – математическое ожидание коэффициента чувствительности;  $\sigma_i$  – среднее квадратическое отклонение коэффициента чувствительности;  $r_{i,i+1}$  – парный коэффициент корреляции между коэффициентами чувствительности (весомости) к обобщенным квалиметрическим параметрам;  $\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n$  – численные значения отклонений обобщенных характеристик относительно эталонных значений, измеренные в нормированных шкалах отношений.

Таким образом, в качестве основной модели, позволяющей оценивать результаты преобразований характеристик в кинематографических системах, предлагается использовать статистическую модель, описываемую характеристическими функциями, и на ее основе формировать интегродифференциальный критерий. Основные преимущества предложенного критерия:

критерий позволяет учитывать *влияние отдельных* характеристик на интегральный показатель качества;

предполагает *вероятностно-статистические подходы* при обработке и анализе субъективных оценок экспертов;

позволяет учитывать *взаимное влияние* отдельных характеристик;

может быть использован на *различных иерархических уровнях структуры* квалиметрических характеристик оцениваемой системы;

удобен для решения задач, связанных не только со сравнительным квалиметрическим анализом, но и для классификации, сертификации; в этом случае критерий принимается функцией принадлежности к терм-множествам многомерной классификационной шкалы;

в данный критерий входят параметры, которые могут быть определены в результате *единой квалиметрической экспертизы*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Евменов, А.Д.** Механизм регулирования сферы культуры: Монография [Текст]/А.Д. Евменов, Л.А. Евменова.–СПб.: Изд. дом «Герда», 2009.
2. **Нестерова, Е.И.** Методология экспертной квалиметрии и сертификации систем качества в кинематографии [Текст]/Е.И. Нестерова.–СПб.: Политехника, 2005.–248 с.
3. **Орлов, А.И.** Современный этап развития теории экспертных оценок [Электронный ресурс]http://www.newtech.ru/n\_orlov/expertoc.htm
4. **Богатина, Е.Х.** О методике оценок технического уровня изделий кинотехники [Текст]/Е.Х. Богатина, Ю.С. Эфрос//Сб. науч. тр. НИКФИ.–М., 1988.
5. **Нестерова, Е.И.** Практические аспекты применения интегральных квалиметрических моделей [Текст]/Е.И. Нестерова//Всерос. НТК «Современные промышленные технологии»: Тезисы докл.–Н.Новгород: Нижегородский научный и информ.-метод. центр «Диалог», 2006.–19 с.
6. **Перегулов, А.Ф.** Модель оценки мультимедального качества мультимедийных материалов [Текст]/А.Ф. Перегулов, К.Ф. Гласман, А.В. Белозерцев [и др.]//

- Матер. науч. и творч. конф. институтов и факультетов СПбГУКиТ.–СПб.: СПбГУКиТ, 2010.–С. 88–89.
7. **Певзнер, Б.М.** Качество цветных телевизионных изображений [Текст]/Б.М. Певзнер.–М.: Радио и связь, 1988.
8. **Нестерова, Е.И.** Квалиметрия и техническое регулирование в кинематографии [Текст]/Е.И. Нестерова.–СПб.: Политехника, 2010.–183 с.
9. **Левин, Б.Р.** Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике [Текст]/Б.Р. Левин.–М.: Сов. радио, 1957.–495 с.
10. **Тихонов, В.И.** Статистическая радиотехника [Текст]/В.И. Тихонов.–М.: Радио и связь, 1982.–2-е изд., перераб. и доп.–624с.
11. **Гнеденко, Б.В.** Курс теории вероятностей: Учебник [Текст]/Б.В. Гнеденко.–М.: Наука. Физматлит, 1988.–Изд.6-е перераб. и доп.–448 с.
12. **Коломенский, Н.Н.** Новый интегродифференциальный критерий оценки качества изображения и звука кинематографических и кинотелевизионных систем [Текст]/Н.Н. Коломенский//Техника кино и телевидения.–1992.–№ 5.



УДК 004.94

Л.А. Хворова, А.Г. Топаж

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ АГРОЭКОСИСТЕМ И ИХ АДАПТАЦИЯ К КОНКРЕТНЫМ УСЛОВИЯМ

### Предпосылки разработки методов и алгоритмов структурно-параметрической идентификации моделей

Разработано достаточно много моделей продуктивности агроэкосистем, которые имеют свою специфическую структуру, реализующую конкретные цели разработчиков [1–3]. Однако в большинстве существующих моделей ряд процессов, происходящих в агроэкосистеме, описан на полуэмпирическом (или даже эмпирическом) уровне. Кроме того, появляются новые экспериментальные факты, которые не нашли отражения в ранее созданных моделях. Это означает, что процесс совершенствования моделей является непрерывным и свидетельствует об актуальности темы исследования, посвященной вопросам идентификации и адаптации имитационных динамических моделей производственного процесса.

Полностью адаптировать любую разработанную уже модель к условиям других регионов достаточно сложно, во-первых, без участия самих разработчиков; во-вторых, цели пользователей могут не совпадать с целями разработчиков моделей; в-третьих, необходимое информационное обеспечение моделей может отличаться от той агрометеорологической информации, которой владеет пользователь [4]. Поэтому в практике применения таких моделей возникают проблемы модификации структуры модели, отдельных ее блоков, включения в модель новых блоков, позволяющих реализовать практические цели пользователя, а также определения необходимой агрометеорологической информации и параметров, входящих в модель, прямые измерения которых в данных условиях невозможны или затруднены. Процесс решения данных проблем можно отнести к процедуре *структурно-параметрической идентификации*. *Структурная и параметрическая идентификация динамических моделей продуктивности и их адаптация к конкретным почвенно-климатическим условиям – главное условие их применимости*, а вопросы теории и

техники идентификации моделей делают эту проблему актуальной.

### Отличительные признаки методов структурно-параметрической идентификации моделей агроэкосистем

Необходимо отметить, что классическая теория идентификации рассматривает, в основном, автоматизированные системы, технологические процессы и задачи управления ими. *Предмет теории идентификации* – решение задачи построения математических моделей динамических систем по данным наблюдений за их поведением [5].

Вопросы структурной идентификации моделей являются новыми для математического моделирования продуктивности агроэкосистем. Сформулируем основные отличия методов идентификации в применении к моделям агроэкосистем от методов классической теории идентификации в применении к моделям автоматизированных динамических систем.

1. В классической теории идентификации задача идентификации формулируется следующим образом [6]. Задан объект, в процессе нормального функционирования которого одновременно (синхронно) могут быть измерены его входная  $x$  и выходная  $y$  переменные. По результатам измерения  $x(t)$  и  $y(t)$  необходимо построить модель заданного объекта, т. е. найти оператор, ставящий в соответствие выходную  $y(t)$  и входную  $x(t)$  функции.

При идентификации агроэкосистем невозможна одновременная фиксация значений  $x(t)$  и  $y(t)$ , где  $x(t)$  – набор агрометеорологической информации,  $y(t)$  – набор выходных характеристик (урожайность сельскохозяйственной культуры, характеристики роста и развития культуры, характеристики почвы и т. п.). Наиболее значимые результаты могут быть получены лишь по прошествии определенного периода времени (вегетационного периода, который для яровых зерновых культур составляет в среднем для условий Алтай-

ского края четыре месяца). Здесь можно говорить о некотором начальном состоянии вектора входной информации  $x_0(t)$  (например, на дату сева), который, в принципе, не является достаточно информативным для предсказания значения  $y(t)$ . На величину  $y(t)$  влияют постоянно изменяющиеся значения вектора  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))$ , где  $m$  – число различных агрометеорологических факторов. Причем, на определенных временных этапах (этапах вегетационного периода сельскохозяйственных культур) значимость отдельных из них для результирующей величины  $y$  постоянно меняется.

2. Модель в понимании многих представителей классической теории идентификации – это уравнение (в основном регрессионное) или система линейных, нелинейных алгебраических или дифференциальных уравнений. Модель агроэко-системы имеет более сложную структуру (структуру блочного типа), включающую в себя описание множества подсистем, каждая из которых может быть описана подобным образом.

3. Различие в наборах входных данных (данных наблюдений). Если входные данные рассматриваемых в классической теории идентификации динамических систем можно представить в виде вполне обзримой матрицы небольшой размерности, то для качественной идентификации агроэкологических систем требуются многолетние ежедневные данные за 10–20 лет, содержащие агрометеорологическую информацию. То есть набор данных для идентификации агроэко-систем является существенно многомерным.

4. Особенность функционирования моделей производственного процесса блочного типа – разделение информационных потоков на те, которые замыкаются внутри отдельных блоков, и те, которые передаются из блока в блок. С одной стороны, это обстоятельство обеспечивает простоту модификации блоков или их замену (достаточно, чтобы альтернативные реализации конкретного блока удовлетворяли заранее утвержденному интерфейсу информационного взаимодействия с другими блоками). С другой стороны, это может значительно усложнить процедуру комплексной идентификации структуры и параметров моделей к условиям конкретного региона.

5. Для идентификации автоматизированных систем и технологических процессов в классической теории идентификации разработано достаточное количество методов и критериев

оптимизации параметров [5–8]: методы параметрического оценивания, непараметрические временные и частотные методы, рекуррентные методы и т. д. При решении задачи структурной идентификации агроэко-систем и моделей их продуктивности исключительно важную роль играет человеческий фактор: интуиция и жизненный опыт исследователя [8].

6. Под *структурной идентификацией* моделей производственного процесса будем понимать определение состава моделируемых процессов (совокупности внутренних связей и отношений, а также связей между агроэко-системой и окружающей средой) и их параметрическую формализацию; под *адаптацией* – приспособление модели к новым условиям.

Содержание процесса идентификации в данном определении понимается значительно шире, чем построение математической модели объекта или процесса по априорной информации и апостериорным измерениям. Структурная идентификация моделей агроэко-систем – это этап познавательной деятельности, связанной с поиском адекватной постановки прикладной задачи. В такой формулировке задача идентификации является задачей научного познания различных объектов и явлений. Существенная особенность познавательных моделей заключается в том, что они обязательно должны отражать механизм объекта или явления в своей структуре, т. е. все многообразие причинно-следственных связей, имеющих у объекта и выявленных в процессе идентификации. В противном случае познавательная ценность модели существенно снижается.

7. Классическая теория идентификации в основном рассматривает тип задач, связанный непосредственно с потребностью управления объектом. Поэтому модель, созданная для целей управления, может и не отражать внутренних механизмов явления. Главное, чтобы она достаточно точно отражала качественные и количественные или только количественные соотношения между управляющими входными и управляемыми выходными, а также измеряемыми сигналами объекта в определенных условиях его функционирования. Математическое описание таких моделей строится по результатам исследования входных и выходных переменных объекта-оригинала, без учета его физической природы. В литературе по идентификации в основном рассматривается только этот класс моделей [5–8].

Необходимо отметить, что общих формальных подходов к решению задачи идентификации в широком смысле к настоящему времени не существует. Метод структурно-параметрической идентификации моделей агросистем основан на рассмотрении рассогласования между поведением реальной системы  $I^0$  и соответствующим поведением модельной системы с параметрами  $I$ . Именно поэтому необходимо вводить в модель дополнительные или альтернативные подмодели с целью вариации структуры модели и адекватного описания отдельных процессов, соответствующих, во-первых, целям потенциальных пользователей и наличию необходимой агрометеорологической информации, а, во-вторых, обеспечивающих качество идентификации.

**Постановка задачи структурно-параметрической идентификации моделей агросистем**

Рассмотрим класс моделей  $\mathfrak{Z} = (\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_2, \dots, \mathfrak{Z}_m)$ , представляющих собой динамические балансовые структуры блочного типа и описывающих систему «почва–растение–атмосфера». Причем, каждая  $\mathfrak{Z} = \mathfrak{Z}(X, Y, S, \Sigma, F)$ , где  $x_i \in X, i = 1, n_x$  – совокупность входных воздействий на систему;  $s_i \in S, i = 1, n_s$  – совокупность воздействий внешней среды;  $\sigma_i \in \Sigma, i = 1, n_\sigma$  – совокупность внутренних (собственных) параметров системы;  $y_i \in Y, i = 1, n_y$  – совокупность выходных характеристик системы.

Функция  $F = \{F_1, \dots, F_n\}$  есть не что иное, как разрешающий оператор совокупности математических соотношений, позволяющих по заданным входам  $x_i \in X, i = 1, n_x$  и внешним воздействиям  $s_i \in S, i = 1, n_s$ , с той или иной определенностью находить функции  $y_i \in Y, i = 1, n_y$  на интервале  $t_0 \leq t \leq t_n$ :

$$y_1(t) = F_1(x_1, \dots, x_n, s_1, \dots, s_n, \sigma_1, \dots, \sigma_n, t),$$

$$\dots\dots\dots$$

$$y_n(t) = F_n(x_1, \dots, x_n, s_1, \dots, s_n, \sigma_1, \dots, \sigma_n, t)$$

или в короткой записи

$$Y(t) = F(X, S, \Sigma, t). \tag{1}$$

Зависимость (1) называется законом функционирования модельной системы  $I$ .

Необходимо из класса моделей  $\mathfrak{Z} = (\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_2, \dots, \mathfrak{Z}_m)$  выбрать модель  $\mathfrak{Z}_i \subset \mathfrak{Z}$  с законом функционирования  $F^*: (\mathfrak{Z}^0) \rightarrow \mathfrak{Z}_i$  (скобки обозначают, что  $F^*$  – частично определенное отображение, т. е. не все

черты состава и структуры оригинала  $\mathfrak{Z}^0$  отражаются моделью) таким, что  $Y(t) = F^*(X, S, \Sigma, t) + \varepsilon$ . Функциональное преобразование  $F^*$  может быть выбрано из условия  $\|Y(t) - F^*(X, S, \Sigma, t)\| < \varepsilon$  в некотором пространстве выбранного класса функций  $F^*$ , или чтобы минимизировать некоторый критерий рассогласования модельной системы и системы-оригинала (критерий качества модели):  $\mathfrak{R}_F^* \rightarrow \min_{F^* \in F}$ .

**Требования к моделям и алгоритмическая схема решения задачи структурно-параметрической идентификации**

Сформулируем основные требования, предъявляемые к модели  $\mathfrak{Z}_i \subset \mathfrak{Z}$  системы-оригинала  $\mathfrak{Z}^0$ .

Полнота выбранной модели должна предоставлять пользователю возможность получения необходимого набора оценок характеристик системы с требуемой точностью и достоверностью.

Гибкость модели должна давать возможность воспроизведения различных ситуаций при варьировании структуры, алгоритмов и параметров системы.

Структура модели должна быть блочной, т. е. допускать замены, добавления и исключения некоторых частей без переделки всей модели.

Информационное обеспечение должно предоставлять возможность эффективной работы модели с базой данных систем определенного класса.

Программные и технические средства должны обеспечивать эффективную работу с моделью и удобное общение с ней пользователя.

Должно быть реализовано проведение целенаправленных компьютерных экспериментов с моделью системы с использованием аналитико-имитационного подхода.

С учетом этих требований предлагается алгоритмическая схема решения задачи структурно-параметрической идентификации моделей с целью их адаптации к конкретным почвенно-климатическим условиям региона.

1. Определение цели применения модели (изучение какой-либо стороны функционирования системы-оригинала; конкретизация оперативных производственных задач, которые необходимо решить в процессе эксплуатации модели и т. п.).

2. Выделение основных процессов в агросистеме, подлежащих моделированию.

3. Выбор объекта идентификации – некоторой модельной системы  $\mathfrak{Z}$  (базовой модели).

4. Обоснование структуры информационного обеспечения модели, анализ доступных для решения задачи идентификации структуры данных.

5. Проведение структурно-параметрической идентификации модели согласно целям и задачам эксплуатации модели на основе имеющейся агрометеорологической информации. На данном этапе производится тестирование модели, делается вывод о возможности ее адаптации и применения в условиях региона, принимается решение об изменении структурно-функционального строения, определяется набор дополнительных или альтернативных подмоделей, осуществляется их разработка и включение в базовую модель.

6. Оценка адекватности проведенной структурно-параметрической идентификации модели (верификация модели на независимом материале).

Структурно-параметрическая идентификация и адаптация выбранной модели – процесс итеративный, т. е. для получения наилучшей модельной структуры, в общем случае, будет построена последовательность модельных структур  $\mathfrak{Z}^*_1, \mathfrak{Z}^*_2, \dots, \mathfrak{Z}^*_k$ , принадлежащих классу моделей  $\mathfrak{Z}$ , и выбрана оптимальная модельная структура  $\mathfrak{Z}^*_{\text{опт}}$  с оптимальным разрешающим оператором  $F^*_{\text{опт}} = \arg \min_{F^* \in F} \mathfrak{R}$ , наилучшим образом удовлетворяющая как целям исследования, так и наличию исходной информации для адаптации модели к конкретным условиям региона.

#### **Анализ структурно-функционального строения модели продуктивности EPIC и ее адаптация к конкретным условиям**

Продемонстрируем изложенные выше принципы структурно-параметрической идентификации на примере адаптации конкретной модели (EPIC) к условиям Западной Сибири.

1. Цель выбора модели – прогнозирование урожайности зерновых культур с учетом возможных вариаций агрометеорологических условий года.

2. При различных возможных реализациях погодных сценариев на любом этапе вегетационного периода должна быть доступной информация о состоянии водно-теплового режима почвы и посева, роста и развития растений для выработки и принятия технологических решений. Поэтому в модели должны быть представлены блоки, описывающие все основные процессы, происходящие в системе «почва–растение–атмосфера».

3. Согласно цели определяется и класс модели – динамическая структура блочного типа – имитационная модель EPIC [3].

Рассмотрим процедуру адаптации модели EPIC к условиям Западной Сибири и ее структурную идентификацию.

*Имитационная модель EPIC* – Erosion-Productivity Impact Calculator, разработана Техасской сельскохозяйственной научно-исследовательской лабораторией (США) для оценки последствий эрозии почв на продуктивность посевов. Это, естественно, наложило отпечаток на ее структурную и алгоритмическую реализацию.

4. В модели EPIC используется стандартная агрометеорологическая информация. Однако при отсутствии какого-либо показателя, он заменяется смоделированным значением.

5. Результаты тестирования модели биопроductивности EPIC показали, что параметрами, наиболее влияющими на рост и развитие растений, являются: приходящая солнечная радиация, температура воздуха и поверхности почвы, осадки.

5.1. Тестирование блока радиации. Расчеты приходящей солнечной радиации по модели проводились для г. Барнаула (Алтайский край), г. Тобольска (Тюменская обл.), г. Коченёво (Новосибирская обл.). Наблюдаются существенные расхождения между экспериментальными данными и рассчитанными по EPIC (табл.).

Изучение блока радиации модели EPIC показало, что при отсутствии экспериментальных данных (а данные по суммарной радиации измеряются не всеми метеостанциями) исходный блок модели EPIC позволяет найти только максимальную суммарную приходящую радиацию. Ее ослабление для условий конкретного дня вычисляется следующим образом: если количество осадков больше нуля, то суммарная радиация уменьшается в два раза. Указанный алгоритм носит очень приближенный характер и приводит к большим ошибкам в расчетах. Вместе с тем, на многих агрометеостанциях и агрометеопостах России измеряется облачность или продолжительность солнечного сияния. Использование этих косвенных данных может значительно увеличить точность оценки поступающей к посеву солнечной радиации.

5.2. В модели большое влияние на рост и развитие растений оказывает температура на по-

Значения суммарной солнечной радиации, МДж/м<sup>2</sup>-сут

	Барнаул			
	Май	Июнь	Июль	Август
Наблюдаемые	19,34	19,93	20,10	22,06
Рассчитанные по ЕРИС	37,51	37,35	37,46	43,25
Рассчитанные по (2)–(12)	21,88	20,66	18,53	14,97
	Тобольск			
Наблюдаемые	21,68	23,73	22,55	14,68
Рассчитанные по ЕРИС	38,23	30,94	33,93	33,32
Рассчитанные по (2)–(12)	23,68	22,68	20,29	12,55
	Коченёво			
Наблюдаемые	20,37	22,60	19,13	17,81
Рассчитанные по ЕРИС	41,85	33,78	34,77	39,67
Рассчитанные по (2)–(12)	23,11	20,00	14,27	11,32

верхности почвы. При ее отсутствии в экспериментальных данных происходит грубая замена смоделированными данными, что сказывается на результатах расчетов по модели.

5.3. Содержание минеральных веществ в почве, в частности, содержание азота, не оказывает существенного влияния на величину биомассы.

При тестировании остальных блоков выявлен адекватный отклик модели на изменение параметров. Модель адекватно реагирует на стрессовые ситуации: недостаток или избыток влаги, низкую или высокую кислотность почвы, содержание гумуса в почве. Однако в результате глобальных стрессов (засуха, переувлажнение) не происходит гибели растения, а лишь приостановка его развития. Величина урожая в модели зависит от сроков сева.

Учитывая все сказанное выше, можно сделать вывод о том, что модель ЕРИС в «чистом» виде не может быть использована для прогноза урожайности на территории Западной Сибири, необходима ее модификация. Для этого были сохранены те блоки модели, которые хорошо идентифицируются на данных по Западной Сибири, и модифицированы блоки радиации, теплового режима почвы с использованием исследований радиационного режима атмосферы и теплового режима почвы [1, 9].

Приведем в качестве примера основные соотношения, составляющие предложенную модификацию блока радиационного режима. В его рамках моделируется приходящая к посеву солнечная радиация, поглощенная посевом коротковолновая радиация, тепловая радиация и ФАР. Для солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность земли, используется соотношение:

$$R_c = \left( a_{sn} + b_{sn} \frac{n}{N} \right) R_a, \quad (2)$$

где  $N$  – длительность светового дня, ч;  $n$  – число часов солнечного сияния;  $R_a$  – солнечная радиация, приходящая к границе атмосферы. Входящие в эту зависимость коэффициенты  $a_{sn} = 0,22$ ,  $b_{sn} = 0,54$ .

Величина  $R_a$  рассчитывается по соотношению:

$$R_a = R_0 \sin(h_0), \quad (3)$$

где  $R_0$  – солнечная постоянная, равная 1370 Дж/м<sup>2</sup>с;  $h_0$  – высота солнца над горизонтом.

Расчет высоты солнца производится по формуле:

$$\begin{aligned} \sin h_0 &= \sin \varphi \cos \delta + \\ &+ \cos \varphi \cos \delta \cos(2\pi(t_h + 12)/24), \quad (4) \\ \delta &= -0,408 \cos(2\pi(t_d + 10)/365), \end{aligned}$$

где  $\varphi$  – географическая широта местности;  $\delta$  – угол склонения солнца;  $t_h$  – время суток, отсчитываемое от полудня, ч;  $t_d$  – номер дня по Юлианскому календарю.

Радиационный баланс посева  $R_{nc}$  определяется по значению приходящей интегральной радиации с учетом альбедо  $\alpha$ :

$$R_{nc} = (1 - \alpha)R_c. \quad (5)$$

Приходящая к посеву радиация включает в себя две составляющие – прямую и рассеянную (диффузную) части. При безоблачном небе, когда  $n/N \approx 1$ , доля диффузной радиации определяется по формуле

$$D/S = \min\{1; 01/\sinh_0\}, \quad (6)$$

где  $S$  – прямая радиация,  $D$  – диффузная. При наличии облачности, т. е. в тех случаях, когда  $n/N \leq 0,9$ , прямая радиация отсутствует, и вся радиация является диффузной.

Функция ослабления суммарного потока радиации при ее проникновении вглубь посева для растений рассчитывается по полуэмпирической формуле Х.Г. Тооминга [8]:

$$a_{\Sigma}(L) = \frac{(S/D) \exp(-c_1 L \sin h_0) + a_D(L, h_0)}{1 + S/D} + c_2 [\exp(-c_1 c_3 \sin h_0) - \exp(-c_1 L / \sin h_0)], \quad (7)$$

где  $c_1 = 0,5$ ,  $c_2 = 0,3$ ,  $c_3 = 0,15$ ;  $L$  – величина листового индекса.

Функция ослабления радиации используется для расчета радиации, поглощенной в некотором слое фитомассы. Так, для яруса листьев между двумя поверхностями с листовыми индексами  $L'$  и  $L''$  поглощенная радиация равна:

$$\Delta R_p = R_c (1 - \alpha) (a_{\Sigma}(L') - a_{\Sigma}(L'')). \quad (8)$$

В соответствии с этим радиационный баланс на поверхности почвы определяется как

$$\Delta R_s = R_c (1 - \alpha) (1 - a_{\Sigma}(L)). \quad (9)$$

Переход от суммарной радиации к суммарной ФАР осуществляется по формуле

$$Q_{\Phi} = c_Q R_c, \quad (10)$$

где коэффициент перехода  $c_Q$  равен

$$c_Q = (c_s S D^{-1} + c_D) (1 + S/D).$$

При этом величина  $c_s$  зависит от высоты стояния солнца, а  $c_D$  постоянна и приблизительно равна 0,6. Поглощение ФАР растением рассчитывается по тем же формулам, что и для интегральной радиации, если положить в них  $c_2 = 0$ .

Для величины длинноволнового радиационного баланса принято соотношение:

$$R_{nl} = (0,9 \frac{n}{N} + 0,1) \cdot (0,34 - 0,139 \cdot \sqrt{e_d}) \times \sigma \cdot 0,5 \cdot (T_{\max}^4 + T_{\min}^4), \quad (11)$$

где  $e_d$  – дефицит влажности воздуха, кПа;  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  – максимальная и минимальная температуры

воздуха, К;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, МДж/м<sup>2</sup> К<sup>4</sup> сут.

Радиационный баланс посева равен:

$$R_{np} = R_{nc} - R_{nl}. \quad (12)$$

Результаты численных расчетов величины приходящей радиации по альтернативному блоку радиационного режима посева для трех регионов Западной Сибири приведены в таблице и говорят о хорошем совпадении экспериментальных данных с расчетными. Положительный результат получен и после модификации блока теплового режима почвы. Идентификация параметров модели проводилась одновременно в рамках единого алгоритма идентификации.

Результаты исследовательской работы:

сформулированы принципы и разработан алгоритм структурно-параметрической идентификации моделей продукционного процесса для их адаптации к конкретным почвенно-климатическим условиям регионов;

алгоритм структурно-параметрической идентификации реализован на модели биопродуктивности ЕРІС (модернизирована структура модели за счет модификации блока радиационного режима и включения блока теплового режима почвы);

модифицированная модель ЕРІС адаптирована к условиям Западной Сибири и может быть использована в области упреждающего прогнозирования урожайности зерновых культур.

Следует отметить, что модель ЕРІС, разработанная в 80-х гг. прошлого столетия, не соответствует уровню развития современных информационных технологий в области моделирования продукционного процесса растений. Прогресс в развитии как элементной базы, так и программного обеспечения заставляет пересмотреть принципы построения интерфейса модели.

Работа выполнена при поддержке ведомственно-аналитической программы «Развитие научного потенциала Высшей школы 2009–2010» №2.2.2.4/4278.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Полуэктов, Р.А.** Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур [Текст]/Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж.–СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006.–396 с.
2. **Penning de Vries, F.W.T.** Simulation of ecophysiological processes of growth of several annual crops [Текст]/F.W.T. Penning de Vries, D.M. Jensen, H.F.M. ten Berge, A.H. Baketa.–Wageningen, 1989.–308 p.
3. **Williams, J.R.** The EPIC Model [Текст]/J.R. Williams.–Temple, 1984.
4. **Полуэктов, Р.А.** Адаптируемость динамических моделей агроэкосистемы к различным почвенно-климатическим условиям [Текст]/Р.А. Полуэктов, И.В. Опарина, А.Г. Топаж [и др.]/Математическое моделирование.–2000.–Т. 12.–№ 11.–С. 3–16.
5. **Льюнг, Л.** Идентификация систем. Теория для

пользователя [Текст]/Л. Льюнг.–М.: Наука, 1991. –432 с.

6. **Гроп, Д.** Методы идентификации систем [Текст]/Д. Гроп.–М.: Мир, 1979.–302 с.

7. Современные методы идентификации систем [Текст]/Под ред. П. Эйкхоффа.–М.: Мир, 1983.–400 с.

8. **Гинсберг, К.С.** Неклассические задачи теории

структурной идентификации [Текст]/К.С. Гинсберг// Гр. Междунар. конф. Идентификация систем и задачи управления.–М.–2000.–С. 992–1005.

9. **Тооминг, Х.Г.** Солнечная радиация и формирование урожая [Текст]/Х.Г. Тооминг.–Л: Гидрометеозидат, 1977.–200 с.

УДК 519.8

*В.А. Матвеев*

## КОНУСНАЯ ОПТИМАЛЬНОСТЬ В ИГРОВОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ С ВЕКТОРНЫМИ ВЫИГРЫШАМИ

Математическое моделирование – важнейшая составляющая научно-технического прогресса. Методы математического моделирования активно развиваются, охватывая все новые сферы – от разработки сложных технических систем до анализа экономических и социальных процессов. Активное развитие общества приводит к все более сложным системам управления – разнообразны требования, предъявляемые к их работе, появляются новые критерии, диктуемые новой технической, экономической и социальной реальностью. Это вызывает необходимость изучения все более сложных управляемых систем [1]. В статье представлена такая модель: динамическая игровая задача с векторными выигрышами у каждого игрока.

Рассматривается линейно-квадратичная динамическая игровая задача двух лиц с векторными выигрышами у каждого игрока:

$$\Gamma_2 = \langle \Sigma, U, V, \{I^{(i)}\}_{i \in M_1}, \{J^{(j)}\}_{j \in M_2} \rangle. \quad (1)$$

Здесь  $\{I^{(i)}\}_{i \in M_1}$  ( $\{J^{(j)}\}_{j \in M_2}$ ) – векторная функция выигрыша, составленная из критериев первого (второго) игрока. Аналогичная многокритериальная динамическая задача изучалась в [2]. Векторная функция выигрыша первого (второго) игрока задается набором  $m_1$  ( $m_2$ ) компонент и множеством номеров компонент –  $M_1 = \{1, \dots, m_1\}$  ( $M_2 = \{1, \dots, m_2\}$ ).

В задаче  $\Gamma_2$  динамика управляемой динамической системы  $\Sigma$  описывается системой  $n$  линейных дифференциальных уравнений и начальными условиями:

$$\dot{x} = A(t)x + B_1(t)u + B_2(t)v, \quad (2)$$

$$x(t_0) = x_0. \quad (3)$$

Элементы квадратной матрицы  $A(t)$ , порядка  $n$ , предполагаются непрерывными функциями на отрезке времени  $[t_0, \Theta]$ , т. е.  $A(t) \in C_{n \times n}[t_0, \Theta]$ . Матрица  $B_1(t) \in C_{n \times k_1}[t_0, \Theta]$  ( $B_2(t) \in C_{n \times k_2}[t_0, \Theta]$ ). Здесь  $0 \leq t_0 < \Theta$  – фиксированные моменты начала и окончания процесса. Текущее состояние системы  $\Sigma$  в каждый момент времени  $t \in [t_0, \Theta]$ , характеризуется фазовым вектором  $x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n$ . Этот вектор зависит от времени, т. е.  $x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$  и представляет всю информацию, которой располагают первый и второй игроки в момент времени  $t \in [t_0, \Theta]$ . Задана начальная позиция  $(t_0, x_0) \in [0, \Theta] \times R^n$ .

В (2)–(3) представлено изменение вектора состояния системы  $x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n$  под воздействием стратегий  $u = u(t, x)$  и  $v = v(t, x)$  первого и второго игроков соответственно. Дифференциальное уравнение (2) предъясвляет определенные требования к их «функциональной природе». Стратегия или управляющее воздействие игрока отождествляется с вектор-функцией  $u(t, x) = P(t)x$  ( $v(t, x) = Q(t)x$ ), где элементы  $k_1 \times n$  матрицы  $P(t)$  ( $k_2 \times n$  матрицы  $Q(t)$ ) предполагаются непрерывными для  $t \in [t_0, \Theta]$ . Множество его стратегий:

$$U = \{u = P(t)x \mid P(t) \in C_{k_1 \times n}[t_0, \Theta]\} \quad (4)$$

$$(V = \{v = Q(t)x \mid Q(t) \in C_{k_2 \times n}[t_0, \Theta]\}.$$

В управляемой системе  $\Sigma$  используется стратегия по принципу обратной связи, т. е. стратегия зависит от ситуации  $(t, x) \in [t_0, \Theta] \times R^n$ . В то же время применяется наиболее простой вид та-

ких стратегий – линейных по фазовому вектору  $x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n$  и непрерывных от времени  $t \in [t_0, \Theta]$ . «Математические» и «инженерные» причины такого выбора управлений подробно представлены в литературе [3, с. 247–252; 4, с. 9–11].

Управляемый процесс реализуется следующим образом. Вначале каждый из двух игроков выбирает и использует позиционные стратегии  $u = P(t)x \in U$  и  $v = Q(t)x \in V$ . Согласно (4) выбор стратегий сводится к выбору конкретных функциональных матриц  $P(t) \in C_{k_1 \times n}[t_0, \Theta]$  и  $Q(t) \in C_{k_2 \times n}[t_0, \Theta]$ . При таком выборе (2) превращается в систему линейных однородных дифференциальных уравнений. При заданном начальном условии (3) такая система имеет [5, с. 21–24] единственное, непрерывно дифференцируемое решение  $x^*(t)$ , продолжимое на весь интервал задачи  $[t_0, \Theta]$ . Затем, с помощью найденного решения  $x^*(t) \in C[t_0, \Theta]$ , выявляются реализации стратегий первого и второго игроков

$$u^* = P(t)x^*(t) \in U, \quad v^* = Q(t)x^*(t) \in V.$$

На наборах  $(x^*(t), u^*(t, x(t)), v^*(t, x(t)))$  определены  $m_1$ -компонентная векторная функция выигрышей первого игрока и  $m_2$ -компонентная векторная функция выигрышей второго игрока. Компоненты заданы квадратичными функционалами:

$$I^{(i)}(u, t_0, x_0) = x^T(\Theta)C_i^{(1)}x(\Theta) + \int_{t_0}^{\Theta} u^T(t, x(t))D_i^{(1)}u(t, x(t))dt, \quad i \in M_1, \quad (5)$$

$$J^{(j)}(v, t_0, x_0) = x^T(\Theta)C_j^{(2)}x(\Theta) + \int_{t_0}^{\Theta} v^T(t, x(t))D_j^{(2)}v(t, x(t))dt, \quad j \in M_2. \quad (6)$$

Здесь  $C_i^{(1)}, D_i^{(1)}, i \in M_1$ ,  $C_j^{(2)}, D_j^{(2)}, j \in M_2$  – постоянные квадратные симметричные матрицы порядка  $n$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  соответственно;  $T$  (здесь и далее) означает операцию транспонирования. В (5) слагаемое  $\int_{t_0}^{\Theta} u^T(t, x(t))D_i^{(1)}u(t, x(t))dt$  называется *интегральным*, а  $x^T(\Theta)C_i^{(1)}x(\Theta)$  – *терминальным слагаемым* компоненты  $I^{(i)}(u, t_0, x_0)$ ,  $i \in M_1$ , векторной функции выигрыша. Аналогичные названия для слагаемых в (6). На содержательном уровне цель первого (второго) игрока – выбор такой стратегии  $u(t, x) \in U$  ( $v(t, x) \in V$ ), при которой все критерии  $I^{(i)}(u(t, x), t_0, x_0)$ ,  $i \in M_1$  ( $J^{(j)}(v(t, x), t_0, x_0)$ ,  $j \in M_2$ ) принимают возможно

большие значения. Учитывая (2)–(6), задача (1) называется *линейно-квадратичной, динамической ( $m_1, m_2$ )-компонентной игровой задачей*.

В задаче (1) можно определить равновесное решение по системе конусов  $K = (K_1, K_2)$ , где конусы заданы в соответствующих пространствах выигрышей, т. е.  $K_i \subset R^{m_i}, i = 1, 2$ . Аналогичное решение для игровой задачи в «статическом» случае представлено в [6]. Определим равновесное решение в динамическом случае. Ситуация  $(u^*(t, x), v^*(t, x)) \in U \times V$  в игровой задаче двух лиц (1) называется *равновесной* по системе конусов  $K = (K_1, K_2)$ , если для любых позиционных стратегий  $u = Q_1(t)x \in U$  и  $v = Q_2(t)x \in V$ , соответственно, первого и второго игроков, выполнены условия

$$I(u(t, x), t_0, x_0) - I(u^*(t, x), t_0, x_0) \notin K_1,$$

$$J(v(t, x), t_0, x_0) - J(v^*(t, x), t_0, x_0) \notin K_2.$$

Игровая задача (1) является задачей с неполной информацией по сравнению со стандартной игровой задачей двух лиц. Неопределенность связана с векторной функцией выигрыша у первого и у второго игроков, т. е. с отсутствием у каждого из них скалярной функции выигрыша. Неопределенность, связанную с векторным выигрышем у игроков, можно сокращать или даже снимать, используя дополнительную информацию. Среди конусных решений можно проводить процедуру уточнения, как это определено в многокритериальной динамической задаче [2] и игровой «статической» задаче [6]. Такой алгоритм позволяет существенно сократить множество претендентов на наилучшую (оптимальную) ситуацию или даже выделить единственное уточненное по системе конуса равновесие.

Один из возможных подходов связан с использованием экспертных оценок. От «своих» экспертов каждый игрок получает информацию об относительной важности компонент «своей» векторной функции выигрыша. Например, каждой компоненте  $I^{(i)}(u(t, x), t_0, x_0)$ ,  $i \in M_1$ , эксперт для первого игрока ставит в соответствие неотрицательное число – весовой коэффициент, указывающий важность этой компоненты относительно других компонент векторной функции выигрыша. Таким образом, эксперт первого игрока формирует вектор весовых коэффициентов для всех  $m_1$  компонент. Пусть сформировано  $m_1$  таких векторов, составленных из весовых коэффи-

циентов. Они задают квадратную матрицу  $A_1$ , у которой  $i$ -я строка определяется  $i$ -м экспертом первого игрока. Матрица  $A_1$  является матрицей отношений экспертов к компонентам векторной функции выигрыша первого игрока. По аналогичной схеме другая группа экспертов формирует квадратную матрицу  $A_2$ , порядка  $m_2$ , отношений экспертов к компонентам векторной функции выигрыша второго игрока. Такие матрицы задают два (полиэдральных) конуса доминирования, аналогично [7, с. 169–172] в критериальном пространстве  $R^{m_1}$  и  $R^{m_2}$  соответственно.

В качестве уточненного равновесного решения линейно-квадратичной, динамической  $(m_1, m_2)$ -компонентной игровой задачи (1) будем рассматривать уточненное по последовательности матриц равновесие, представленное по аналогии с уточненным по последовательности конусов оптимальным решением для многокритериальной задачи [7, с. 172–176]. Последовательность матриц, реализующая процесс уточнения решения для каждого игрока, задается степенями соответствующей матрицы  $A_i$ ,  $i \in \{1, 2\}$ .

Рассмотрим последовательность пар матриц  $(A_1^n, A_2^n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ . Каждая такая пара определяет пару конусов, соответственно, в критериальных пространствах  $R^{m_1}$  и  $R^{m_2}$ . По аналогии с утверждением 2 из [7, с. 172], существует предел последовательности из пар матриц  $(A_1^n, A_2^n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , и этот предел обозначим  $(A_{10}, A_{20})$ . Каждая предельная матрица является вырожденной (ранг равен единице) и определяется левым собственным вектором, относящимся к максимальному собственному значению  $\lambda^* = 1$ . Эти левые собственные векторы для первой матрицы  $A_1$  и для второй матрицы  $A_2$  имеют размерность  $m_1$  и  $m_2$  соответственно. Обозначим их

$$\alpha^{(0)} = (\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, \dots, \alpha_{m_1}^{(0)}), \quad (7)$$

$$\alpha_1^{(0)} + \alpha_2^{(0)} + \dots + \alpha_{m_1}^{(0)} = 1, \quad \alpha_i^{(0)} > 0, \quad i \in M_1,$$

$$\beta^{(0)} = (\beta_1^{(0)}, \beta_2^{(0)}, \dots, \beta_{m_2}^{(0)}), \quad (8)$$

$$\beta_1^{(0)} + \beta_2^{(0)} + \dots + \beta_{m_2}^{(0)} = 1, \quad \beta_i^{(0)} > 0, \quad i \in M_2$$

для первой и второй матрицы.

Для линейно-квадратичной динамической  $(m_1, m_2)$ -компонентной игровой задачи двух лиц (1) уточненным по паре последовательностей матриц  $(A_1^n, A_2^n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , равновесным решением является ситуация равновесия по Нэшу в бескоалиционной линейно-квадратичной динамической

игровой задаче двух лиц:

$$\Gamma_3 = \langle \Sigma, U, V, I, J \rangle. \quad (9)$$

Игровая задача (9) отличается от игровой задачи (1) только скалярными функциями выигрыша для первого и второго игроков:

$$I = \alpha_1^{(0)} I^{(1)}(u, t_0, x_0) + \alpha_2^{(0)} I^{(2)}(u, t_0, x_0) + \dots + \alpha_{m_1}^{(0)} I^{(m_1)}(u, t_0, x_0), \quad (10)$$

$$J = \beta_1^{(0)} J^{(1)}(v, t_0, x_0) + \beta_2^{(0)} J^{(2)}(v, t_0, x_0) + \dots + \beta_{m_2}^{(0)} J^{(m_2)}(v, t_0, x_0). \quad (11)$$

Отметим, что в последних формулах вектор  $\alpha^{(0)} = (\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, \dots, \alpha_{m_1}^{(0)})$  из (7) и вектор  $\beta^{(0)} = (\beta_1^{(0)}, \beta_2^{(0)}, \dots, \beta_{m_2}^{(0)})$  из (8).

Сформулируем достаточные условия существования уточненного по последовательности матриц равновесия в игровой динамической задаче (1). Эти условия можно сформулировать с помощью подходящей модификации метода динамического программирования [4, с. 223–228] для бескоалиционной игровой задачи (9). При изучении таких задач будем рассматривать квадратичные формы и соответствующие им матрицы. В частности, выделим знакоопределенные квадратичные формы (матрицы) [8, с. 276]. Матрица  $C(\alpha)$  называется *положительно (отрицательно, неотрицательно, неположительно) определенной*, если  $\forall x \in R^n$  верно неравенство  $x^T C(\alpha) x > 0$  ( $x^T C(\alpha) x < 0$ ,  $x^T C(\alpha) x \geq 0$ ,  $x^T C(\alpha) x \leq 0$ ), и это будет обозначаться  $C(\alpha) > 0$  ( $C(\alpha) < 0$ ,  $C(\alpha) \geq 0$ ,  $C(\alpha) \leq 0$ ).

Рассмотрим матрицу  $A_1 \in R_{m_1 \times m_1}$  отношений экспертов к компонентам векторной функции выигрыша первого игрока. Ее можно считать стохастической [8, с. 381]. Для такой матрицы на основании утверждения 2 из [7, с. 172] существует предельная матрица и все ее строки равны  $\alpha^{(0)} = (\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, \dots, \alpha_{m_1}^{(0)})$ ,  $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1, \alpha_i > 0$  (7).

С помощью набора чисел  $\alpha^{(0)}$  определяется скалярная функция выигрыша для первого игрока (10). Из (10), (7) и (5) следует

$$I(u, t_0, x_0) = \sum_{i=1}^{m_1} \alpha_i^{(0)} I^{(i)}(u, t_0, x_0) = \sum_{i=1}^{m_1} \alpha_i^{(0)} x^T(\vartheta) C_i^{(1)} x(\vartheta) + \sum_{i=1}^{m_1} \alpha_i^{(0)} \int_{t_0}^{\vartheta} u^T(t, x(t)) D_i^{(1)} u(t, x(t)) dt = \quad (12)$$

$$= x^T(\vartheta)C^{(1)}(\alpha^{(0)})x(\vartheta) + \int_{t_0}^{\vartheta T} u(t, x(t))D^{(1)}(\alpha^{(0)})u(t, x(t))dt. \quad (12)$$

Здесь  $I^{(i)}(u, t_0, x_0)$ ,  $i \in M_1$ , из (5), вектор  $\alpha^{(0)} = (\alpha_1^{(0)}, \dots, \alpha_{m_1}^{(0)}) \in R^{m_1}$  из (7) и  $C^{(1)} = C^{(1)}(\alpha^{(0)}) = \sum_{i=1}^{m_1} \alpha_i^{(0)}C^{(1)}$ ,  $D^{(1)} = D^{(1)}(\alpha^{(0)}) = \sum_{i=1}^{m_1} \alpha_i^{(0)}D^{(1)}$ .

По аналогичной схеме из (11), (8) и (6) следует:

$$J(v, t_0, x_0) = \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j^{(0)} J^{(j)}(v, t_0, x_0) = \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j^{(0)} x^T(\vartheta)C_j^{(2)}x(\vartheta) + \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j^{(0)} \int_{t_0}^{\vartheta T} v(t, x(t))D_j^{(2)}v(t, x(t))dt = x^T(\vartheta)C^{(2)}(\beta^{(0)})x(\vartheta) + \int_{t_0}^{\vartheta T} v(t, x(t))D^{(2)}(\beta^{(0)})v(t, x(t))dt. \quad (13)$$

В последней формуле (13)  $J^{(j)}(u, t_0, x_0)$ ,  $j \in M_2$ , из (6), вектор  $\beta^{(0)} = (\beta_1^{(0)}, \dots, \beta_{m_2}^{(0)}) \in R^{m_2}$  из (8) и  $C^{(2)} = C^{(2)}(\beta^{(0)}) = \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j^{(0)}C^{(2)}$ ,  $D^{(2)} = D^{(2)}(\beta^{(0)}) = \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j^{(0)}D^{(2)}$ .

**Утверждение 1.** Рассматривается линейно-квадратичная, динамическая  $(m_1, m_2)$ -компонентная игровая задача (1). Матрица  $A_1 \in R_{m_1 \times m_1}$  ( $A_2 \in R_{m_2 \times m_2}$ ) отношений экспертов к компонентам векторной функции выигрыша первого (второго) игрока является неотрицательной, невырожденной, неразложимой, стохастической. Левый собственный вектор для матрицы отношений экспертов  $A_1 \in R_{m_1 \times m_1}$  ( $A_2 \in R_{m_2 \times m_2}$ ) приведен в (7) ((8)), и матрицы  $C^{(1)} = C^{(1)}(\alpha^{(0)})$  и  $D^{(1)} = D^{(1)}(\alpha^{(0)})$  ( $C^{(2)} = C^{(2)}(\beta^{(0)})$  и  $D^{(2)} = D^{(2)}(\beta^{(0)})$ ) из определения скалярной функции выигрыша (12) ((13)) обладают свойствами

$$\begin{aligned} C^{(1)} &= C^{(1)}(\alpha^{(0)}) = \sum_{i=1}^{m_1} (\alpha_i^{(0)})C^{(1)} \leq 0, \\ D^{(1)} &= D^{(1)}(\alpha^{(0)}) = \sum_{i=1}^{m_1} (\alpha_i^{(0)})D^{(1)} < 0 \\ (C^{(2)} &= C^{(2)}(\beta^{(0)}) \leq \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j^{(0)}C^{(2)}, \\ D^{(2)} &= D^{(2)}(\beta^{(0)}) = \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j^{(0)}D^{(2)} < 0). \end{aligned} \quad (14)$$

Пусть система двух матричных уравнений типа Риккати с начальными условиями

$$\dot{\Theta}_1 + A^T(t)\Theta_1 + \Theta_1 \cdot A(t) - \Theta_1 \cdot B_1(t)(D^{(1)}(\alpha^{(0)}))^{-1} \times$$

$$\times B_1^T(t)\Theta_1 - 2 \cdot \Theta_1 \cdot B_2(D^{(2)})^{-1} \cdot B_2^T \cdot \Theta_2 = 0_{n \times n},$$

$$\dot{\Theta}_2 + A^T(t)\Theta_2 + \Theta_2 \cdot A(t) - \Theta_2 \cdot B_2(t)(D^{(2)}(\beta^{(0)}))^{-1} \times$$

$$\times B_2^T(t) \cdot \Theta_2 - 2 \cdot \Theta_2 \cdot B_1(D^{(1)})^{-1} \cdot B_1^T \cdot \Theta_1 = 0_{n \times n},$$

$$\Theta_1(\vartheta) = -2C^{(1)}(\alpha^{(0)}),$$

$$\Theta_2(\vartheta) = -2C^{(2)}(\beta^{(0)}), \quad (15)$$

имеет единственное продолжимое решение для любого  $t \in [t_0, \vartheta]$ . Тогда в задаче (1) при любом выборе начальной позиции  $(t_0, x_0) \in [0, \vartheta] \times R^n$  существует уточненное по последовательности пар матриц  $(A_1^n, A_2^n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , равновесное решение  $(u^*(t, x), v^*(t, x)) \in U \times V$ , и соответствующие стратегии имеют вид

$$u^* = u^*(t, x) = -(D^{(1)}(\alpha^{(0)}))^{-1} \cdot B^T(t) \cdot \Theta_1(t)x, \quad (16)$$

$$v^* = v^*(t, x) = -(D^{(2)}(\beta^{(0)}))^{-1} \cdot B^T(t) \cdot \Theta_2(t)x, \quad (17)$$

где  $(\Theta_1(t), \Theta_2(t))$ ,  $t_0 \leq t \leq \vartheta$ , – решение (15) и  $x = x(t)$  – решение дифференциального уравнения (2) с начальным условием (3) и при выборе равновесной ситуации  $(u^*(t, x), v^*(t, x)) \in U \times V$ .

Доказательство. Для линейно-квадратичной динамической  $(m_1, m_2)$ -компонентной игровой задачи двух лиц (1) уточненным по паре последовательностей матриц  $(A_1^n, A_2^n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , равновесным решением является ситуация равновесия по Нэшу в бескоалиционной линейно-квадратичной динамической игровой задаче двух лиц (9). Матрица  $A_1 \in R_{m_1 \times m_1}$  ( $A_2 \in R_{m_2 \times m_2}$ ) отношений экспертов к компонентам векторной функции выигрыша первого (второго) игрока является неотрицательной, невырожденной, неразложимой, стохастической. Тогда левый собственный вектор можно выбрать из условия (7) ((8)). Значит, функции выигрышей в бескоалиционной игре (9) можно представить в виде (12) и (13). Определение равновесной ситуации в (9) сводится к решению системы из двух задач динамического программирования для функций (12) и (13):

$$\max_{u \in U} I(u, t_0, x_0) = I(u^*, t_0, x_0), \quad (18)$$

$$\max_{v \in V} J(v, t_0, x_0) = J(v^*, t_0, x_0). \quad (19)$$

Решение последней задачи будем искать согласно рецептам динамического программирования Беллмана [4, с. 223–228; 9, с. 366–369]. Определим две скалярные функции:

$$W_1(t, x, u, V_1) = \frac{\partial V_1}{\partial t} +$$

$$+ \left[ \frac{\partial V_1}{\partial x} \right]^T \cdot [A(t)x + B_1(t)u] + \frac{1}{2} u^T \cdot D^{(1)}(\alpha^{(0)})u, \quad (20)$$

$$W_2(t, x, v, V_2) = \frac{\partial V_2}{\partial t} + \quad (21)$$

$$+ \left[ \frac{\partial V_2}{\partial x} \right]^T \cdot [A(t) \cdot x + B_2(t) \cdot v] + \frac{1}{2} v^T \cdot D^{(2)}(\beta^{(0)})v.$$

Здесь  $V = (V_1(t, x), V_2(t, x))$  – некоторая неизвестная функция. Стратегии из ситуации равновесия найдем из условий (18), (19). Используем достаточные условия максимума:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_1}{\partial u} &= B_1^T \cdot \frac{\partial V_1}{\partial x} + D^{(1)}(\alpha^{(0)})u = 0, \\ \frac{\partial^2 W_1}{\partial u^2} &= D^{(1)}(\alpha^{(0)}) < 0, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_2}{\partial v} &= B_2^T \cdot \frac{\partial V_2}{\partial x} + D^{(2)}(\beta^{(0)})v = 0, \\ \frac{\partial^2 W_2}{\partial v^2} &= D^{(2)}(\beta^{(0)}) < 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Неравенства в (22) и (23) выполнены в силу условий (14) и означают, что матрицы  $D^{(1)}(\alpha^{(0)})$  и  $D^{(2)}(\beta^{(0)})$  отрицательно определены. Тогда

$$u^* = -(D^{(1)})^{-1} \cdot B_1^T \cdot \frac{\partial V_1}{\partial x}, \quad (24)$$

$$v^* = -(D^{(2)})^{-1} \cdot B_2^T \cdot \frac{\partial V_2}{\partial x}. \quad (25)$$

Как принято для линейно-квадратичных задач, будем считать, что функции  $V_1 = V_1(t, x)$  и  $V_2 = V_2(t, x)$  имеют вид:

$$V_1 = V_1(t, x) = \frac{1}{2} x^T \cdot \Theta_1(t) x, \quad (26)$$

$$V_2 = V_2(t, x) = \frac{1}{2} x^T \cdot \Theta_2(t) x.$$

Здесь неизвестными величинами являются симметрические матрицы  $\Theta_1 = \Theta_1(t)$ ,  $\Theta_2 = \Theta_2(t)$ , порядка  $n_1$  и  $n_2$  соответственно, элементы которых есть непрерывные функции от  $t \in [t_0, \mathfrak{G}]$ .

Тогда из (24), (26) и (25), (26), по аналогии с [10, с. 207], следует (16) и (17) соответственно:

$$u^* = u^*(t, x) = -(D^{(1)}(\alpha^{(0)}))^{-1} \cdot B^T(t) \cdot \Theta_1(t) x,$$

$$v^* = v^*(t, x) = -(D^{(2)}(\beta^{(0)}))^{-1} \cdot B^T(t) \cdot \Theta_2(t) x.$$

Подставляя полученные стратегии  $u^* = u^*(t, u) \in U$ ,  $v^* = v(t, x) \in V$  и  $V_1, V_2$  из (26) в равенства

$$W_1(t, x, u^*; V_1) = 0, \quad V_1(\mathfrak{G}, x) = \frac{1}{2} x^T \cdot C^{(1)}(\alpha^{(0)}) x,$$

$$W_2(t, x, v^*; V_2) = 0, \quad V_2(\mathfrak{G}, x) = \frac{1}{2} x^T \cdot C^{(2)}(\beta^{(0)}) x,$$

где функции  $W_1(t, x, u^*; V_1)$ ,  $W_2(t, x, v^*; V_2)$  заданы в (20) и (21) соответственно, мы получаем, что матрицы  $\Theta_1(t) \in C_{n_1 \times n_1}[t_0, \mathfrak{G}]$  и  $\Theta_2(t) \in C_{n_2 \times n_2}[t_0, \mathfrak{G}]$  удовлетворяют матричной системе уравнений Риккати и начальным условиям (15), а по данным утверждения такое решение единственно и продолжимо для  $t \in [t_0, \mathfrak{G}]$ .

Таким образом, при любом выборе начальной позиции  $(t_0, x_0) \in [0, \mathfrak{G}] \times R^n$ , ситуация  $(u^*(t, x), v^*(t, x)) \in U \times V$  является равновесной в бескоалиционной линейно-квадратичной динамической игре двух лиц (9) и, значит, уточненным по последовательности пар матриц  $(A_1^n, A_2^n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , равновесным решением игровой задачи с векторными выигрышами у каждого игрока (1).

**Утверждение 2.** Рассматривается линейно-квадратичная, динамическая  $(m_1, m_2)$ -компонентная игровая задача (1). Постоянные квадратные симметрические матрицы из (5), (6) удовлетворяют условиям

$$\begin{aligned} C_i^{(1)} \leq 0, \quad D_i^{(1)} < 0, \quad i \in M_1, \\ C_j^{(2)} \leq 0, \quad D_j^{(2)} < 0, \quad j \in M_2. \end{aligned} \quad (27)$$

Матрица  $A_1 \in R_{m_1 \times m_1}$  ( $A_2 \in R_{m_2 \times m_2}$ ) отношений экспертов к компонентам векторной функции выигрыша первого (второго) игрока является неотрицательной, невырожденной, неразложимой, стохастической. Для управляемой динамической системы  $\Sigma$ , описываемой системой  $n$  линейных дифференциальных уравнений и начальными условиями (2), (3), соответствующая система дифференциальных матричных уравнений типа Риккати (15) имеет продолжимое решение для  $t \in [t_0, \mathfrak{G}]$ . Тогда в задаче (1) при любом выборе начальной позиции  $(t_0, x_0) \in [0, \mathfrak{G}] \times R^n$  существует уточненное по последовательности пар матриц  $(A_1^n, A_2^n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , равновесное решение  $(u^*(t, x), v^*(t, x)) \in U \times V$ , и соответствующие стратегии имеют вид (24), (25).

Доказательство. Для любых матриц  $A_1 \in R_{m_1 \times m_1}$  ( $A_2 \in R_{m_2 \times m_2}$ ) из условия утверждения, предельная матрица однозначно определяется левым собственным вектором, относящимся к максимальному собственному значению  $\lambda^* = 1$ , и этот вектор

$$\alpha^T = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \quad \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1, \quad \alpha_i \geq 0.$$

Из приведенного условия и (27) следует выполнение (14). Для системы дифференциальных уравнений типа Риккати (15) реализованы усло-

вия теоремы существования и единственности решения, а по условию утверждения это решение продолжимо для  $t \in [t_0, \vartheta]$ . Таким образом, выполнены условия утверждения 1, что и завершает доказательство.

**Утверждение 3.** Рассматривается линейно-квадратичная, динамическая  $(m_1, m_2)$ -компонентная игровая задача (1). Пусть собственные значения матриц  $C_i^{(1)}, i \in M_1, C_j^{(2)}, j \in M_2$  неположительны, а у матриц  $D_i^{(1)}, i \in M_1, D_j^{(2)}, j \in M_2$  они отрицательны. Отношение экспертов к компонентам векторной функции выигрыша первого (второго) игрока, представлено неотрицательной, невырожденной, неразложимой, стохастической матрицей  $A_1 \in R_{m_1 \times m_1} (A_2 \in R_{m_2 \times m_2})$ . Тогда при любом выборе начальной позиции  $(t_0, x_0) \in [0, \vartheta] \times R^n$  существует уточненное по последовательности пар матриц  $(A_1^n, A_2^n), n = 1, 2, \dots$ , равновесное решение  $(u^*(t, x), v^*(t, x)) \in U \times V$ , и соответствующие стратегии имеют вид (24), (25).

Доказательство следует из того, что условие (26) равносильно существованию только неположительных собственных значений у матриц  $C_i^{(1)}, i \in M_1, C_j^{(2)}, j \in M_2$  и только отрицательных собственных значений у матриц  $D_i^{(1)}, i \in M_1, D_j^{(2)}, j \in M_2$ .

*Пример.* Рассматривается линейно-квадратичная, динамическая (2, 2)-компонентная игровая задача (1). Динамика  $\Sigma$  управляемой системы (2)–(3) описывается дифференциальным уравнением

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u(t, x) + v(t, x), \\ x(t) &= 5. \end{aligned}$$

Вектор состояния системы  $x \in R$ . Задан промежуток функционирования  $t \in [0, 1]$ . Скалярные стратегии первого (второго) игрока с полной обратной связью представлены в (4):  $u = p(t)x \in U$  и  $v = q(t)x \in V$ . Ограничения на управление отсутствуют. На реализованных траектории и стратегиях игроков  $(x^*(t), u^*(t, x(t))), (v^*(t, x(t)))$  определены две векторные функции выигрыша первого (второго) игрока, аналогично (5), (6), заданные функционалами:

$$\begin{aligned} I^{(1)}(u, t_0, x_0) &= -x^2(1), \quad I^{(2)}(u, t_0, x_0) = -\int_{t_0}^1 u(t, x(t)) t, \\ J^{(1)}(v, t_0, x_0) &= -x^2(1), \quad J^{(2)}(v, t_0, x_0) = -\int_{t_0}^1 v(t, x(t)) dt. \end{aligned}$$

На содержательном уровне цель первого и второго игроков в этой задаче состоит в выборе таких стратегий  $u = p(t)x \in U$  и  $v = q(t)x \in V$ , при

которых обе компоненты векторной функции выигрыша этого игрока примут возможно большие значения, при этом следует учитывать выбор другого игрока, цель которого – возможно большие значения двух компонент «его» векторного выигрыша.

Матрицы  $A_1 \in R_{m_1 \times m_1} (A_2 \in R_{m_2 \times m_2})$  отношений экспертов к компонентам векторной функции выигрыша первого (второго) игрока заданы

$$A_1 = \begin{pmatrix} 3/5 & 2/5 \\ 4/5 & 1/5 \end{pmatrix}, \quad A_2 = \begin{pmatrix} 1/6 & 5/6 \\ 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}.$$

В качестве решения представленной задачи можно рассматривать равновесные по системе конусов  $(K_1, K_2)$  ситуации, как это представлено в определении 1 из [6, с. 120]. Среди таких решений можно проводить уточнение по паре последовательностей матриц  $(A_1^n, A_2^n), n = 1, 2, \dots$ . Для линейно-квадратичной динамической (2, 2)-компонентной игровой задачи двух лиц уточненным по паре последовательностей матриц  $(A_1^n, A_2^n), n = 1, 2, \dots$ , равновесным решением является ситуация равновесия по Нэшу в бескоалиционной линейно-квадратичной динамической игровой задаче двух лиц (9):

$$\Gamma_3 = \langle \Sigma, U, V, I, J \rangle.$$

Скалярные функции выигрыша первого и второго игроков (10), (11) в этой игре будут равны

$$\begin{aligned} I &= I(u, t_0, x_0) = -\frac{2}{3} I^{(1)}(u, t_0, x_0) - \\ &\quad - \frac{1}{3} I^{(2)}(u, t_0, x_0) = \\ &= -\frac{2}{3} \cdot x^2(1) - \frac{1}{3} \cdot \int_{t_0}^1 u(t, x(t)) t, \\ J &= J(v, t_0, x_0) = -\frac{3}{8} \cdot J^{(1)}(v, t_0, x_0) - \\ &\quad - \frac{5}{8} \cdot J^{(2)}(v, t_0, x_0) = -\frac{3}{8} \cdot x^2(1) - \\ &\quad - \frac{5}{8} \cdot \int_{t_0}^1 v(t, x(t)) t. \end{aligned}$$

Отметим, что левый собственный вектор, относящийся к максимальному собственному значению  $\lambda^* = 1$ , для матрицы  $A_1 \in R_{2 \times 2}$  равен  $c_1 = (2/3, 1/3)$ , а для матрицы  $A_2 \in R_{2 \times 2}$  будет  $c_2 = (3/8, 5/8)$ .

Стратегии из уточненной равновесной ситуации задачи (1) или, что то же самое, ситуации равновесной по Нэшу в бескоалиционной игровой задаче (9), определяются из условий

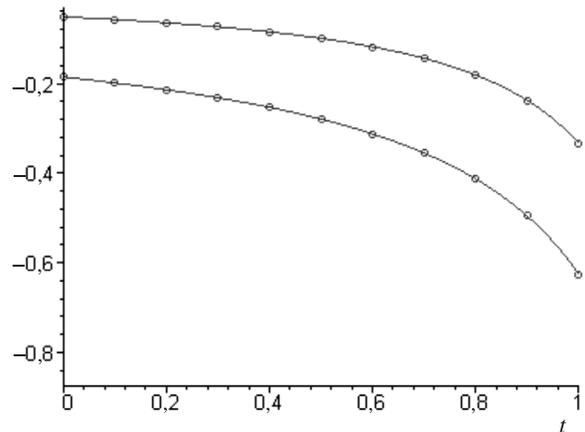
$$u^*(t) \in \arg \max_{u \in U} (-\frac{2}{3} I^{(1)}(u, t_0, x_0) -$$

$$v^*(t) \in \arg \max_{v \in V} \left( -\frac{3}{8} J^{(1)}(u(t), t_0, x_0) - \frac{1}{3} I^{(2)}(u(t), t_0, x_0) - \frac{5}{8} J^{(2)}(u(t), t_0, x_0) \right).$$

Для рассматриваемой линейно-квадратичной динамической (2,2)-компонентной игровой задачи выполнены условия утверждений 1 и 2. Действительно, учитывая компоненты векторных функций выигрыша для первого и второго игроков и положительные собственные векторы для матриц отношений экспертов  $A_1, A_2$ , получаем, что верно (14). Тогда, в представленной задаче при любом выборе начальной позиции  $(t_0, x_0) \in [0, \vartheta) \times R^n$ , существует уточненное по последовательности пар матриц  $(A_1^n, A_2^n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , равновесное решение  $(u^*(t, x), v^*(t, x)) \in U \times V$ , и соответствующие стратегии имеют вид (16), (17). Для нахождения этой ситуации составим систему двух уравнений типа Риккати (15):

$$\begin{cases} \dot{\Theta}_1 + \frac{3}{2} \Theta_1^2 + \frac{16}{3} \Theta_1 \cdot \Theta_2 = 0, & \Theta_1(1) = -\frac{1}{3}, \\ \dot{\Theta}_2 + \frac{8}{3} \Theta_2^2 + 3 \cdot \Theta_1 \cdot \Theta_2 = 0, & \Theta_2(1) = -\frac{5}{8}. \end{cases} \quad (28)$$

Полученную систему с краевыми условиями решаем численным методом Рунге–Кутты 4 или 5 порядков, модифицированным Фелбергом [11]. В среде программирования Maple 14 используется процедура `gkf45`. Точность приближенных вычислений здесь и далее определяется границей абсолютной погрешности  $\varepsilon = 10^{-6}$  для приближенного решения дифференциальной задачи (28). Это означает, что промежуточные и окончательный результат могут отличаться от точного значе-



Графики решений системы дифференциальных уравнений

ния не более чем на 0,5 ε. В таблице приведено численное решение, представленное в форме табличных функций.

На рисунке приведены графики решений системы дифференциальных уравнений (28). Здесь верхняя линия представляет график функции  $\Theta_1 = \Theta_1(t)$ , а нижняя линия – график для  $\Theta_2 = \Theta_2(t)$ ,  $t \in [0, 1]$ .

На основании информации о значениях стратегий первого и второго игроков из таблицы можно определить аппроксимации для стратегий:

$$u(t, x) = \frac{3}{2} x (-10,543302t^{12} + 54,585125t^{11} - 123,791751t^{10} + 160,388340t^9 - 130,210123t^8 + 68,135159t^7 - 22,689801t^6 + 4,411604t^5 - 0,410190t^4 - 0,059152t^3 - 0,042107t^2 - 0,055514t - 0,051639); \quad (29)$$

Табличные значения функций  $\Theta_1(t), \Theta_2(t)$ , являющихся решением задачи (28)

$t$	-0,100000	0,000000	0,100000	0,200000	0,300000	0,400000	0,500000	0,600000
$\Theta_1(t)$	-0,046565	-0,051639	0,057684	-0,064987	-0,073948	-0,085156	-0,099500	-0,118389
$\Theta_2(t)$	-0,174588	-0,185892	-0,198900	-0,214042	-0,231912	-0,253350	-0,279586	-0,312507

$t$	0,700000	0,800000	0,900000	1,000000	1,100000	1,200000	1,300000
$\Theta_1(t)$	-0,144182	-0,181137	-0,237722	-0,333333	-0,523407	-1,047595	-5,882392
$\Theta_2(t)$	-0,355156	-0,412806	-0,495481	-0,655000	-0,860013	-1,434619	-5,686772

$$\begin{aligned} v(t, x) = & \frac{8}{3}x(-9,733364t^{12} + 50,301702t^{11} - \\ & - 113,942694t^{10} + 147,487824t^9 - \\ & - 119,653906t^8 + 62,568442t^7 - 20,833700t^6 + \\ & + 4,037564t^5 - 0,391728t^4 - 0,078964t^3 - \\ & - 0,079041t^2 - 0,121239t - 0,185892). \end{aligned} \quad (29)$$

На основании полученных стратегий игроков можно определить их выигрыши в ситуации равновесия по Нэшу в бескоалиционной линейно-квадратичной динамической игровой задаче двух лиц (9):

$$(I, J) = (-1,290985; -4,647324).$$

Уточненное по последовательности пар матриц равновесное решение линейно-квадратичной, динамической (2,2)-компонентной игровой задачи (1) есть ситуация  $(u, v) \in U \times V$  и аппроксимации стратегий представлены в (29) и в таблице. В уточненной равновесной ситуации векторный выигрыш первого игрока

$$I = (I^{(1)}, I^{(2)}) = (-3,2131556, -0,3299007),$$

векторный выигрыш второго игрока

$$J = (J^{(1)}, J^{(2)}) = (-3,2131556, -7,0376065).$$

Отметим, что при анализе представленного примера приближенные вычисления применялись только при решении системы дифференциальных уравнений типа Риккати (28). В работе точность результатов определяется абсолютной погрешностью  $\varepsilon = 10^{-6}$  решения этой системы. Эта точность подтверждается и другими численными методами решения дифференциальных систем, в частности, одношаговым экстраполяционным методом Гира [11].

В статье рассмотрена линейно-квадратичная, динамическая, игровая задача с векторным или  $(m_1, m_2)$ -компонентным выигрышем (1). Наличие компонент является выражением неопределенности в системе – неопределенности отношения предпочтения первого и второго игроков. В классификации неопределенностей в задачах управления она выделена в [3, с. 24], как «неопределенность, отражающая нечеткость знания игроками своих целей». Выявление единой целевой функции снимает эту неопределенность.

Рассматриваемый в статье процесс уточнения по последовательности конусов позволяет уменьшить неопределенность для каждого игрока, а в итоге выявить для него единую функцию выигрыша. Такое уточнение существенно использует знания экспертов по рассматриваемой проблеме. Их мнения формализуются в форме матрицы отношений экспертов к компонентам. Эти матрицы и соответствующие им многогранные конусы позволяют свести  $(m_1, m_2)$ -компонентную проблему к стандартной бескоалиционной дифференциальной игре.

Для последней задачи разработаны эффективные методы решения. В частности, в рассматриваемом случае управление осуществляется по принципу обратной связи, т. е. управляющее воздействие зависит от времени и сложившейся позиции. Для нахождения такого оптимального управления можно использовать метод динамического управления Беллмана. Этот алгоритм решения позволяет выявить явный вид уточненного равновесного решения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воробьев, Н.Н.** Современное состояние теории игр [Текст]/Н.Н. Воробьев//Успехи матем. наук.–1970.–№ 25.–Вып. 2.–С. 81–140.
2. **Матвеев, В.А.** Исследование конусной оптимальности в многокритериальной динамической задаче [Текст]/В.А. Матвеев//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2010.–№ 5 (118).–С. 56–62.
3. **Жуковский, В.И.** Риски и исходы в многокритериальных задачах управления [Текст]/В.И. Жуковский, М.Е. Салуквадзе.–Тбилиси: Интеллекти, 2004.–С. 247–252.
4. **Жуковский, В.И.** Линейно-квадратичные дифференциальные игры [Текст]/В.И. Жуковский, А.А. Чикрий.–Киев: Наукова Думка, 1994.
5. **Понтрягин, Л.С.** Обыкновенные дифференциальные уравнения [Текст]/Л.С. Понтрягин.–М.: Наука, 1974.–С. 21–24.
6. **Матвеев, В.А.** Исследование равновесных ситуаций в игровой задаче двух лиц с векторными выигрышами [Текст]/В.А. Матвеев//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2010.–№ 3 (101).–С. 119–126.
7. **Матвеев, В.А.** Исследование оптимальности по конусу в многокритериальной задаче [Текст]/В.А. Матвеев//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 4 (82).–С. 169–176.
8. **Гантмахер, Ф.Р.** Теория матриц [Текст]/Ф.Р. Гантмахер.–М.: Наука, 1967.
9. **Пантелеев, В.И.** Теория управления в примерах и задачах [Текст]/В.И. Пантелеев, А.С. Бортаковский.–М.: Высш. шк., 2003.

10. Ли, Э.Б. Основы теории оптимального управления [Текст]/Э.Б. Ли, Л. Маркус.—М.: Наука, 1972.

11. Forsythe, G.E. Computer Methods of Mathematical Computations [Текст]/G.E. Forsythe, M.A. Malcolm, C.B. Moler.—New Jersey: Prentice Hall, 1977.

УДК 28.50

*А.Л. Ляшенко, О.И. Золотов*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С ПОДВИЖНЫМ ИСТОЧНИКОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Системы с подвижным воздействием – новый класс систем с распределенными параметрами. Это требует разработки специальных методов анализа и синтеза этих систем. Рассмотрим один из таких методов на примере защитного термокожуха для видеокамеры охранного телевидения (рис. 1). Это устройство предназначено для защиты видеокамер, установленных на улице, от воздействия неблагоприятных погодных условий и пыли. Для предотвращения обледенения стекол защитных термокожухов в настоящее время предлагается несколько вариантов систем обогрева, например, с использованием в качестве нагревательных элементов терморезисторов или пластинчатых обогревателей, которые устанавливаются непосредственно на стекло.

Рассматриваемая система принципиально отличается от предлагаемых ранее. В данной системе в качестве нагревательного элемента, по отношению к стеклу, предлагается использовать жидкий теплоноситель. С целью последующего синтеза системы терморегулирования стекла, произведем моделирование тепловых полей защитного термокожуха, представленного ниже.

### Описание конструктивных параметров объекта управления

Рассматриваемый нами защитный термокожух имеет форму цилиндра и состоит из металлического корпуса и сборной пластины.



Рис. 1. Защитный термокожух для видеокамеры

Металлический короб состоит из цилиндрического корпуса, задней стенки (на ней расположены гермовыводы, предназначенные для подключения силовых кабелей) и передней стенки, представляющей собой сборную пластину.

При проведении расчетов будем полагать, что боковые стенки объекта управления изготовлены из алюминия, а задняя стенка изготовлена из теплоизоляционного материала.

Сборная пластина состоит из трех элементов: металлической рамки круглой формы, в которой крепятся энергоблок и обогреваемое стекло; энергоблока, состоящего из кольца, заполненного жидким теплоносителем, и нагревательного элемента (в энергоблоке осуществляется процесс получения тепловой энергии, которая передается обогреваемому стеклу с помощью жидкого теплоносителя) и обогреваемого стекла.

Обогреваемое стекло имеет форму круга. По периметру оно окружено полым кольцом (энергоблоком). Кольцо заполнено жидким теплоносителем. Нагрев теплоносителя осуществляется с помощью нагревательного элемента, расположенного внутри кольца. Теплоноситель циркулирует вдоль кольца, обогревая стекло. В проектируемой системе в качестве жидкого теплоносителя предлагается использовать трансформаторное масло.

### Математическая модель объекта управления

На рис. 2 представлен термокожух, ориентированный в цилиндрической системе координат, и три основных вида: спереди, сверху и справа.

На рис. 3. представлены разрезы А–А и В–В защитного термокожуха (см. рис. 2), ориентированные в цилиндрической системе координат.

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к внутреннему

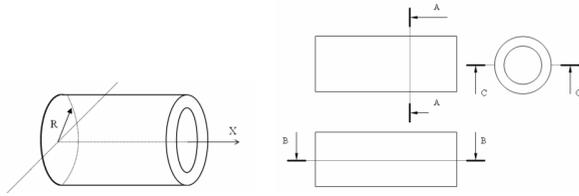


Рис. 2. Защитный термокожух, ориентируемый в цилиндрической системе координат

объему защитного термокожуха, в цилиндрической системе координат [4]:

$$\frac{\partial T_1(x, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_1 \left[ \frac{\partial^2 T_1(x, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_1(x, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_1(x, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, \varphi, R, t)}{\partial x^2} \right] \quad (1)$$

Начальные и граничные условия для дифференциального уравнения (1) зададим соотношениями:

$$T_1(x, \varphi, R, 0) = 0; \quad (2)$$

$$T_1(x, \varphi, R_1, t) = T_5(x, \varphi, R_1, t); \quad (3)$$

$$T_1(x_2, \varphi, R, t) = T_4(x_2, \varphi, R, t); \quad (4)$$

$$T_1(x_2, \varphi, R, t) = T_2(x_2, \varphi, R, t); \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, \varphi, R_1, t)}{\partial R} = \lambda_5 \frac{\partial T_5(x, \varphi, R_1, t)}{\partial R}; \quad (6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x_2, \varphi, R, t)}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4(x_2, \varphi, R, t)}{\partial x}; \quad (7)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x_2, \varphi, R, t)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x_2, \varphi, R, t)}{\partial x}, \quad (8)$$

где  $\lambda_1$  – теплопроводность воздуха внутри корпуса термокожуха;  $\lambda_2$  – теплопроводность ма-

териала, из которого изготовлена металлическая рамка;  $\lambda_4$  – теплопроводность обогреваемого стекла;  $\lambda_5$  – теплопроводность материала, из которого изготовлен корпус термокожуха;  $T_1(x, \varphi, R, t)$  – температурное поле во внутреннем объеме корпуса защитного термокожуха;  $T_2(x, \varphi, R, t)$  – температурное поле в металлической рамке;  $T_4(x, \varphi, R, t)$  – температурное поле обогреваемого стекла;  $T_5(x, \varphi, R, t)$  – температурное поле в корпусе защитного термокожуха.

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к корпусу защитного термокожуха:

$$\frac{\partial T_5(x, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_5 \left[ \frac{\partial^2 T_5(x, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_5(x, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_5(x, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_5(x, \varphi, R, t)}{\partial x^2} \right] \quad (9)$$

На границах соприкосновения слоев выполняется условие равенства температур и тепловых потоков:

$$T_5(x, \varphi, R, 0) = 0; \quad (10)$$

$$T_5(x, \varphi, R_2, t) = T_e(x, \varphi, R_2, t); \quad (11)$$

$$T_5(x, \varphi, R_1, t) = T_1(x, \varphi, R_1, t); \quad (12)$$

$$\lambda_5 \frac{\partial T_5(x, \varphi, R_2, t)}{\partial R} = \lambda_e \frac{\partial T_e(x, \varphi, R_2, t)}{\partial R}; \quad (13)$$

$$\lambda_5 \frac{\partial T_5(x, \varphi, R_1, t)}{\partial R} = \lambda_1 \frac{\partial T_1(x, \varphi, R_1, t)}{\partial R}, \quad (13)$$

где  $\lambda_e$  – теплопроводность воздуха;  $T_e(x, \varphi, R, t)$  – температурное поле воздуха, окружающего корпус защитного термокожуха.

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к металлической рамке:

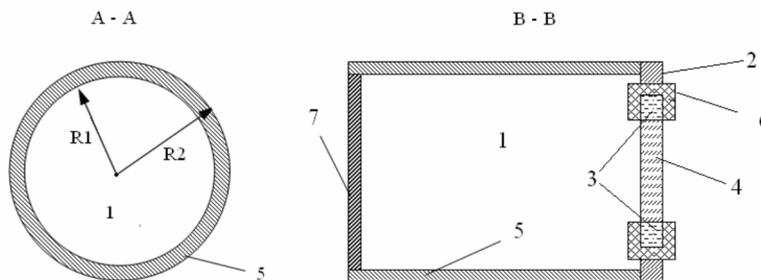


Рис. 3. Устройство защитного кожуха

1 – внутреннее пространство термокожуха; 2 – металлическая рамка; 3 – теплоносущая жидкость; 4 – обогреваемое стекло; 5 – стенка корпуса термокожуха; 6 – теплоизоляция вокруг кольца, заполненного жидким теплоносителем; 7 – задняя стенка термокожуха; R1 – внутренний радиус корпуса термокожуха; R2 – внешний радиус корпуса термокожуха

$$\frac{\partial T_2(x, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_2 \left[ \frac{\partial^2 T_2(x, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_2(x, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_2(x, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_2(x, \varphi, R, t)}{\partial x^2} \right] + \quad (14)$$

Начальные и граничные условия для дифференциального уравнения (14) зададим следующими соотношениями:

$$T_2(x, \varphi, R, 0) = 0; \quad (15)$$

$$T_2(x_3, \varphi, R, t) = T_6(x_3, \varphi, R, t); \quad (16)$$

$$T_2(x, \varphi, R_2, t) = T_6(x, \varphi, R_2, t); \quad (17)$$

$$T_2(x_2, \varphi, R, t) = T_1(x_2, \varphi, R, t); \quad (18)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x_2, \varphi, R, t)}{\partial x} = \lambda_1 \frac{\partial T_1(x_2, \varphi, R, t)}{\partial x}; \quad (19)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x_3, \varphi, R, t)}{\partial x} = \lambda_6 \frac{\partial T_6(x_3, \varphi, R, t)}{\partial x}; \quad (20)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, \varphi, R_2, t)}{\partial R} = \lambda_6 \frac{\partial T_6(x, \varphi, R_2, t)}{\partial R}; \quad (21)$$

$$\frac{\partial T_2(x, \varphi, R_3, t)}{\partial R} = 0. \quad (22)$$

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к обогреваемому стеклу:

$$\frac{\partial T_4(x, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_4 \left[ \frac{\partial^2 T_4(x, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_4(x, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_4(x, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_4(x, \varphi, R, t)}{\partial x^2} \right] + \quad (23)$$

На границах соприкосновения слоев выполняется условие равенства температур и тепловых потоков:

$$T_4(x, \varphi, R, 0) = 0; \quad (24)$$

$$T_4(x_2, \varphi, R, t) = T_1(x_2, \varphi, R, t); \quad (25)$$

$$T_4(x_3, \varphi, R, t) = T_6(x_3, \varphi, R, t); \quad (26)$$

$$T_4(x, \varphi, R_4, t) = T_3(x, \varphi, R_4, t); \quad (27)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4(x_2, \varphi, R, t)}{\partial x} = \lambda_1 \frac{\partial T_1(x_2, \varphi, R, t)}{\partial x}; \quad (28)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4(x_3, \varphi, R, t)}{\partial x} = \lambda_6 \frac{\partial T_6(x_3, \varphi, R, t)}{\partial x}; \quad (29)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4(x, \varphi, R_4, t)}{\partial R} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(x, \varphi, R_4, t)}{\partial R}. \quad (30)$$

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к жидкому теплоносителю:

$$\frac{\partial T_3(x, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_3 \left[ \frac{\partial^2 T_3(x, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_3(x, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_3(x, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_3(x, \varphi, R, t)}{\partial x^2} \right] - \vartheta(R, t) \cdot \frac{\partial T_3(x, \varphi, R, t)}{\partial \varphi}, \quad (31)$$

где  $T_3(x, \varphi, R, t)$  – температурное поле теплоносущей жидкости;  $\vartheta(R, t)$  – скорость движения теплоносущей жидкости.

На границах соприкосновения слоев выполняются условия равенства температур и тепловых потоков.

$$T_3(x, \varphi, R, 0) = 0; \quad (32)$$

$$T_3(x, \varphi, R_4, t) = T_4(x, \varphi, R_4, t); \quad (33)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3(x, \varphi, R_4, t)}{\partial R} = \lambda_4 \frac{\partial T_4(x, \varphi, R_4, t)}{\partial R}; \quad (34)$$

$$\frac{\partial T_3(x, \varphi, R_5, t)}{\partial R} = 0; \quad (35)$$

$$\frac{\partial T_3(x_2, \varphi, R, t)}{\partial x} = 0; \quad (36)$$

$$\frac{\partial T_3(x_3, \varphi, R, t)}{\partial x} = 0, \quad (37)$$

где  $\lambda_3$  – теплопроводность жидкого теплоносителя.

Как уже говорилось, энергоблок представляет собой кольцо, заполненное теплоносителем. Внутри кольца находится нагревательный элемент, с помощью которого осуществляется нагрев теплоносителя.

Область, расположенную внутри кольца над нагревательным элементом, условно назовем входом в канал, по которому течет теплоноситель, а область под нагревательным элементом – выходом.

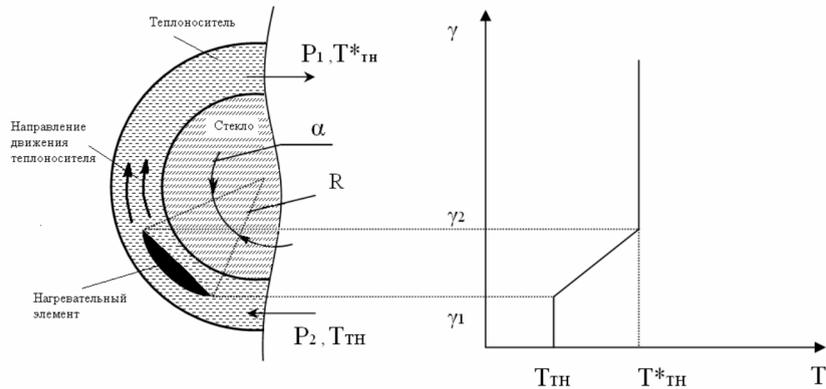


Рис. 4. Энергоблок и график изменения температуры теплоносителя

Вследствие разности давлений теплоносущей жидкости (возникающей в результате ее нагрева) на входе и на выходе канала ( $P_1 - P_2 = \Delta P$ ) она движется со скоростью  $\vartheta(R, t)$ .

Определим скорость  $\vartheta(R, t)$ , с которой движется теплоносущая жидкость. Скорость движения определяется из следующего соотношения [1]:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\eta_{\omega} \cdot \rho}} \quad (38)$$

где  $\rho$  – плотность теплоносителя;  $\Delta P$  – разность давлений на входе и на выходе канала;  $\eta_{\omega}$  – потеря напора в канале.

Потеря напора в канале определяется из следующего соотношения:

$$\eta_{\omega} \rho = 1 + \xi M, \quad (39)$$

где  $\xi M = 0,15$  [1] – потеря напора при повороте потока в канале.

Теплоносущая жидкость, проходя по каналу, соприкасается с нагревательным элементом. При этом будем полагать, что изменение температуры жидкого теплоносителя соответствует графику, приведенному на рис. 4.

Вследствие нагрева теплоносителя увеличивается его объем на величину:

$$\Delta V = S_n (\gamma_2 - \gamma_1) \frac{\Delta T}{2} \mu, \quad (40)$$

где  $S_n$  – площадь поперечного сечения канала;  $\frac{\Delta T}{2}$  – средняя температура нагрева жидкости по длине ( $\gamma_2 - \gamma_1$ );  $\mu$  – коэффициент объемного расширения теплоносителя;  $\gamma_2 - \gamma_1 = l$  – длина дуги, равная длине нагревательного элемента.

Длина дуги  $l$  определяется с использованием следующего уравнения:

$$l = \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha}{180}. \quad (41)$$

Величина  $\Delta T$  определяется из следующего соотношения:

$$\Delta T = T^*_{ТН} - T_{ТН}, \quad (42)$$

где  $T_{ТН}$  – температура теплоносителя на выходе из канала;  $T^*_{ТН}$  – температура теплоносителя на входе в канал.

В результате нагрева теплоносущей жидкости, производимого нагревательным элементом, наблюдается объемное расширение теплоносителя на входе в канал. Вследствие объемного расширения возникает выталкивающая сила  $F$ , которая выталкивает более холодные слои теплоносителя по направлению к выходу из канала. Величину  $F$  определим с помощью следующего уравнения:

$$F = \Delta V \cdot \rho \cdot g, \quad (43)$$

где  $\rho$  – плотность теплоносителя;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Избыточное давление  $\Delta P$  может быть определено из следующего соотношения:

$$\Delta P = \frac{F}{S_n}. \quad (44)$$

Подставляя в соотношение (44) уравнения (40), (41) и (43) получим:

$$\Delta P = (\gamma_2 - \gamma_1) \frac{\Delta T}{2} \mu \cdot g \cdot \rho = \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha}{180} \cdot \frac{\Delta T}{2} \mu \cdot g \cdot \rho. \quad (45)$$

Подставляя полученное выражение (45) в уравнение скорости (38), получим:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha}{180} \cdot \frac{\Delta T}{2} \mu \cdot g \cdot \rho}{(1 + \xi M) \rho}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot R \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot \mu \cdot g}{(1 + 0,15) 180}}. \quad (46)$$

В полученной формуле установлена зависимость скорости движения теплоносущей жидкости  $\vartheta$  от изменения температуры  $\Delta T$ .

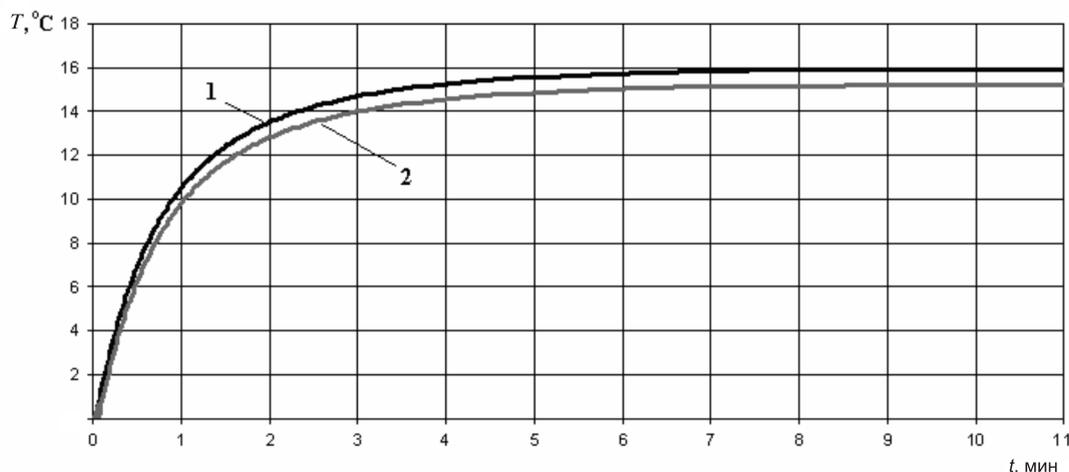


Рис. 5. Графики переходных процессов  
 1 – график, полученный в результате численного эксперимента;  
 2 – график, полученный экспериментальным путем

Для определения адекватности полученной математической модели реальному объекту были проведены экспериментальные исследования и произведено сравнение полученных результатов.

Для проведения экспериментальных исследований тепловых процессов, рассчитанных с помощью модели, была создана лабораторная установка. Данная установка представляет собой физическую модель исследуемого объекта управления. Было проведено семь экспериментов. При проведении экспериментов производились замеры температуры в контрольной точке. По результатам измерений было рассчитано математическое ожидание  $M_T$  и построен усредненный график переходных процессов, который представлен на рис. 5. Математическое ожидание  $M_T$  было рассчитано по формуле:

$$M_T = \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{n}, \quad (47)$$

где  $T_i$  – значение температуры в контрольной точке в  $i$ -м эксперименте;  $n$  – количество экспериментов.

На рис. 5 изображен усредненный график переходных процессов, полученный экспериментальным путем, и график, полученный в резуль-

тате численного эксперимента, проводимого с помощью ЭВМ.

Данная математическая модель получилась достаточно сложной, и решить полученную систему дифференциальных уравнений в частных производных аналитически (выделить передаточную функцию) не представляется возможным.

Для численного анализа рассматриваемого объекта управления были составлены дискретная модель уравнений (1)–(37), (46) и вычислительный алгоритм. В процессе составления дискретных моделей были решены задачи «стыковки» граничных условий, обеспечения устойчивости вычислительной схемы и выбраны шаги дискретизации по пространственным переменным. Верификацию полученных алгоритмов осуществляли с помощью лабораторной установки, на которой были проверены экспериментальные исследования.

По результатам компьютерного моделирования и экспериментальных исследований можно сделать вывод, что разработанная математическая модель позволяет в полном объеме и с высокой точностью описывать тепловые процессы, протекающие в устройствах рассмотренного класса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Першин, И.М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами [Текст]/И.М. Першин. –Пятигорск, РИА на КМВ, 2002.–212 с.
2. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен [Текст]/Ф.Ф. Цветков, Б.А. Гигорьев.–М.: Изд-во МЭИ, 2005.–550 с.
3. Лыков, А.В. Теория теплопроводности[Текст]/А.В. Лыков.–М.: Высш. шк., 1967.–599 с.
4. Шипачев, В.С. Высшая математика: Учебник для вузов [Текст]/В.С. Шипачев.–М.: Высш. шк., 2002.–479 с.

## ИЗМЕРЕНИЕ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЯ

Измерение цветовых различий необходимо в различных областях, например, в полиграфии, лакокрасочной промышленности, при обработке цифровых изображений, в задачах телевизионной метрологии, связанных с измерением цветовых искажений в цифровом телевидении.

В основном существующие методы измерения цветовых различий основаны на преобразовании цветового пространства  $XYZ$ , рекомендованного Международной комиссией по освещению (МКО) в качестве стандартного, в другое пространство, которое в идеальном случае должно быть равноконтрастным. В равноконтрастном пространстве визуальное цветовое различие соответствует евклидову расстоянию между точками цветов. Однако известно, что «проблема построения равноконтрастного пространства на основе преобразования колориметрического трехмерного пространства была поставлена еще Гельмгольцем, показавшим, что пространство, в котором сочетаются метрические свойства цветовых различий и свойства сложения цветов, должно быть

неевклидовым» [2]. Такое заключение отчасти подтверждается неравномерностью и анизотропией пространства МКО  $XYZ$ . Наряду с недостаточной точностью, для существующих методов измерения на базе равноконтрастных пространств характерен недостаток, заключающийся в чисто геометрическом характере преобразований, не отражающем психофизиологические процессы зрения.

В [1] была предложена модель цветосприятия зрительной системы человека. Эта модель, полученная аппроксимацией психофизических данных о порогах цветоразличения, позволяет определить для любой точки цветового пространства МКО  $XYZ$  порог цветоразличения в виде эллипса со следующими параметрами: большой полуосью  $a(x, y)$ , малой полуосью  $b(x, y)$  и углом поворота  $\theta(x, y)$  (рис. 1).

В данной статье предложен новый подход к измерению цветовых различий, отличающийся отсутствием преобразования пространства МКО  $XYZ$  в равноконтрастное пространство. На базе

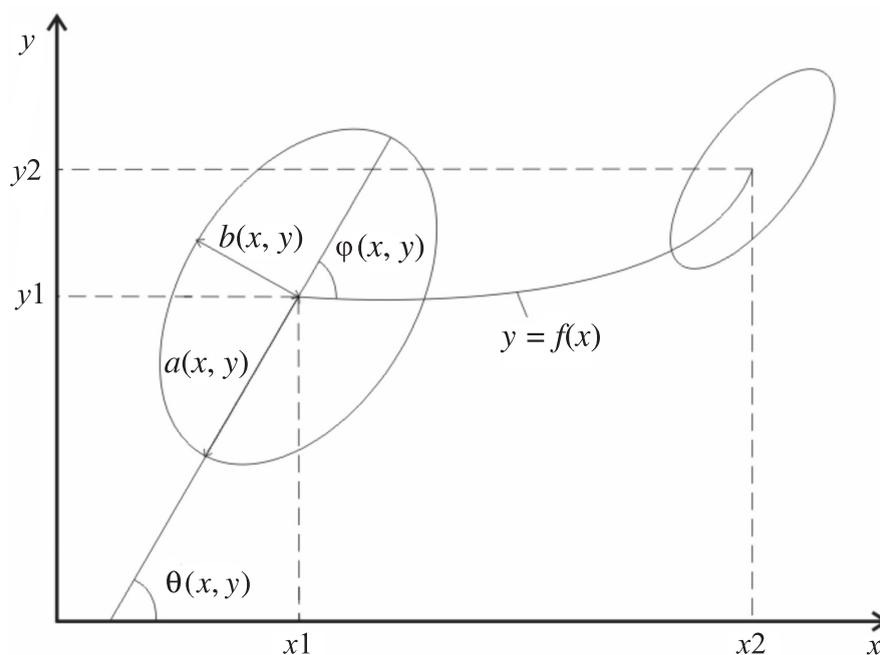


Рис. 1. К вопросу об измерении цветовых различий в неравноконтрастном пространстве

этого подхода разработаны прикладные методы измерения цветовых различий в неравноконтрастном пространстве.

**Основы измерения цветовых различий в неравноконтрастном пространстве.** Под цветовым различием двух точек в неравноконтрастном пространстве МКО  $XYZ$  будем понимать расстояние вдоль некоторой кривой  $y = f(x)$ , измеренное в единицах порога цветовосприятия (см. рис. 1).

Пространство МКО  $XYZ$  является анизотропным, поскольку величина порога цветоразличения, принятого за единицу измерения, зависит от угла  $\varphi(x, y)$  между кривой  $y = f(x)$  и осью эллипса. Кроме того, пространство МКО  $XYZ$  является неравномерным, поскольку величина порога цветоразличения зависит от координат точки цвета. Выразим величину порога цветоразличения через параметры  $a(x, y)$  и  $b(x, y)$  эллипса цветоразличения и угол  $\varphi(x, y)$ .

Уравнение эллипса  $b^2x^2 + a^2y^2 = a^2b^2$ , характеризующего одинаковое восприятие цвета с координатами  $[x, y]$ , запишем в виде  $b^2 + a^2 \frac{y^2}{x^2} = \frac{a^2b^2}{x^2}$ . С учетом того, что  $\frac{y}{x} = \text{tg}\varphi$ , уравнение эллипса примет вид  $b^2 + a^2 \text{tg}^2\varphi = \frac{a^2b^2}{x^2}$ .

Используя соотношения для координат эллипса  $x^2 = \frac{a^2b^2}{b^2 + a^2 \text{tg}^2\varphi}$ ,  $y^2 = x^2 \text{tg}^2\varphi$ , определим порог цветоразличения с координатами  $[x, y]$  в направлении, заданном углом  $\varphi$ :  $\mu(x, y, \varphi) = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{x^2 + x^2 \text{tg}^2\varphi} = \sqrt{x^2(1 + \text{tg}^2\varphi)}$  или  $\mu(x, y, \varphi) = \sqrt{\frac{a^2b^2(1 + \text{tg}^2\varphi)}{b^2 + a^2 \text{tg}^2\varphi}}$ .

Расстояние между двумя точками в цветовом пространстве, измеренное в единицах порога цветоразличения вдоль кривой  $L$ , которая характеризуется однозначной функцией  $y=f(x)$ , определяется в виде интеграла  $d_L = \int_L \frac{1}{\mu} dl$  или

$$d_L = \int_L \sqrt{\frac{b^2 + a^2 \text{tg}^2\varphi}{a^2b^2(1 + \text{tg}^2\varphi)}} \cdot dl. \quad (1)$$

Учитывая, что  $1 + \text{tg}^2\varphi = \frac{1}{\cos^2\varphi}$ , получим расстояние между точками:

$$d_L = \int_L \sqrt{\frac{1}{a^2} \cos^2\varphi + \frac{1}{b^2} \sin^2\varphi} \cdot dl.$$

Заменив  $\varphi = \theta - \alpha$  в выражении (1), получим расстояние в виде:

$$d_L = \int_L \sqrt{\frac{1}{a^2} \cos^2(\theta - \alpha) + \frac{1}{b^2} \sin^2(\theta - \alpha)} dl. \quad (2)$$

Для численного определения расстояния между точками, заменим интеграл в выражении (2) суммой:

$$d_L = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta l \cdot \sqrt{\frac{1}{a_i^2} \cos^2(\theta_i - \alpha_i) + \frac{1}{b_i^2} \sin^2(\theta_i - \alpha_i)},$$

где  $N$  – число разбиений кривой  $L$ ;  $a_i = a(i\Delta l)$ ;  $b_i = b(i\Delta l)$ ;  $\theta_i = \theta(i\Delta l)$  и  $\alpha_i = \alpha(i\Delta l)$ .

Выразив  $dl = dx / \cos(\alpha_x)$ , где  $\alpha_x$  – угол наклона кривой  $L$ , выражение (2) можно записать как

$$d(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\frac{1}{a_x^2} \cos^2(\theta_x - \alpha_x) + \frac{1}{b_x^2} \sin^2(\theta_x - \alpha_x)} \times \frac{1}{\cos(\alpha_x)} dx.$$

В простом случае интегрирование выполняем вдоль прямой, соединяющей точки цветов в пространстве. При интегрировании вдоль прямой угол  $\alpha = \text{arctg}(f'(x))$  не зависит от  $x$ .

Для численного определения интеграла вдоль прямой используем выражения:

$$d_L = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta l \cdot \sqrt{\frac{1}{a_i^2} \cos^2(\theta_i - \alpha) + \frac{1}{b_i^2} \sin^2(\theta_i - \alpha)}, \quad (3)$$

где  $a_i = a(i\Delta l)$ ;  $b_i = b(i\Delta l)$ ;  $\theta_i = \theta(i\Delta l)$

или

$$d(x_1, x_2) = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta x \times \quad (4)$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{a^2(x_i, y_i)} \cdot \frac{\cos^2(\theta(x_i, y_i) - \alpha)}{\cos^2(\alpha)} + \frac{1}{b^2(x_i, y_i)} \cdot \frac{\sin^2(\theta(x_i, y_i) - \alpha)}{\cos^2(\alpha)}}$$

где  $a(x_i, y_i) = a(x_1 + i\Delta x, y_1 + i\Delta x \cdot \text{tg}\alpha)$ ;

$b(x_i, y_i) = b(x_1 + i\Delta x, y_1 + i\Delta x \cdot \text{tg}\alpha)$ ;

$\theta(x_i, y_i) = \theta(x_1 + i\Delta x, y_1 + i\Delta x \cdot \text{tg}\alpha)$ .

Вычислительная сложность определения расстояния в цветовом пространстве зависит от количества  $N$  слагаемых, используемых для приближенного вычисления. В качестве примера возьмем две точки в цветовом пространстве МКО  $XYZ$ , характеристики которых приведены в табл. 1.

Вычислим по формуле (3) расстояние  $d_{1-2}$  между точками 1 и 2 в направлении от точки 1 до точки 2 и расстояние  $d_{2-1}$  в обратном направлении при различных значениях числа  $N$ . На рис. 2 даны зависимости расстояний  $d_{1-2}(N)$  и  $d_{2-1}(N)$ , измеренных в единицах порога различения цвета, от числа  $N$ , представленного в логарифмиче-

Таблица 1

Характеристики выбранных точек

	$x$	$y$	$a$	$b$	$\theta, \text{град}$
Точка 1	0,220	0,320	0,006	0,0029	79,780
Точка 2	0,190	0,150	0,0045	0,0012	83,553

ском масштабе. Из рис. 2 можно заключить, что значения расстояний  $d_{1-2}(N)$  и  $d_{2-1}(N)$ , вычисленных в двух направлениях, сходятся при достаточно малом участке разбиения и практически не различаются при  $N > 2^8$ .

При  $N = 2^8$  длина участка разбиения равна  $\Delta l = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{2^8} \approx 0,00067$ , при этом расстояние между точками 1 и 2  $d_{1-2} \cong d_{2-1} \cong 32,51$  порогов, и разность  $|d_{1-2}(N) - d_{2-1}(N)|$  не превышает 0,04 порога. При дальнейшем увеличении числа до  $N = 2^9$  величина  $|d_{1-2}(N) - d_{2-1}(N)|$  не превышает 0,02 порога. Таким образом, при вычислении расстояния между двумя точками цветового пространства необходимо учитывать порядка 250 слагаемых. Поэтому для некоторых применений, в которых количество операций вычисления по формуле (3) велико, например, в телевидении при расчете цветовых искажений каждого пикселя кадра изображения, вычисление становится трудоемким, занимает много времени,

не отвечает требованиям работы в реальном времени и, следовательно, требуется введение упрощений.

**Приближенные методы измерения цветовых различий в неравноконтрастном пространстве.** Для обеспечения возможности измерений в реальном времени необходимо разработать приближенные методы измерения цветовых различий, работающие с приемлемой для практики точностью.

*Метод 1*, использующий предположение о локальной равномерности цветового пространства. При вычислении расстояний между точками, расположенными недалеко в пространстве цветов можно сделать допущение о локальной равномерности цветового пространства вдоль определенного направления. Для равномерного пространства порог  $\mu$  цветоразличения вдоль отрезка прямой между точками 1 и 2 не зависит от координат  $x, y$ , а расстояние между точками 1 и 2  $d_{1-2} = d_{2-1} = d$  определяется по формуле:

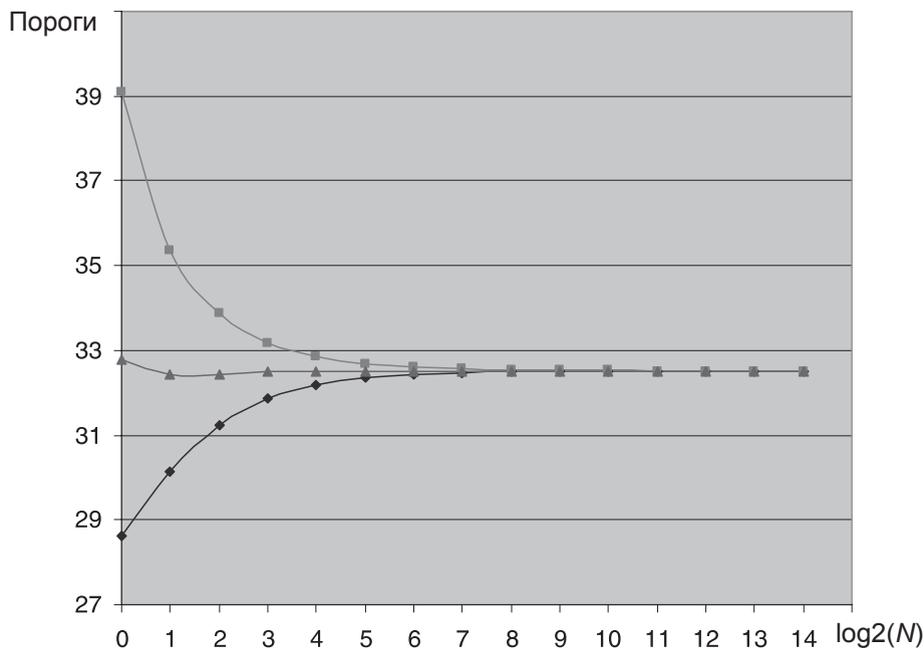


Рис. 2. Зависимость числа порогов от числа участков разбиения отрезка  
( $\blacklozenge$ )  $d_{1-2}$ ; ( $\blacksquare$ )  $d_{2-1}$ ; ( $\blacktriangle$ ) оптим

Таблица 2

Характеристики относительной погрешности приближенных методов

	Приближенные методы			
	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 4
Среднее относительной погрешности	0,0043	0,0019	-0,0015	-0,0016
Среднеквадратическое отклонение	0,0736	0,0202	0,0131	0,0106

$$d = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{\mu} \quad (5)$$

Предположение о локальной равномерности пространства цветов справедливо, например, при вычислении небольших по величине цветовых различий.

В противном случае, результаты измерения, вычисленные в прямом и в обратном направлении, не равны между собой  $d_{1-2} \neq d_{2-1}$ .

*Метод 2*, позволяющий в упрощенном виде учитывать неравномерность цветового пространства. Расстояния  $d^{(1)}_{1-2}$  и  $d^{(1)}_{2-1}$  вычисляются по методу 1 и имеют разные начальные единицы измерения  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . В методе 2 расстояния  $d$  между точками цветового пространства предлагается вычислять как среднее значение  $d = \frac{d^{(1)}_{1-2} + d^{(1)}_{2-1}}{2}$  расстояний  $d^{(1)}_{1-2}$  и  $d^{(1)}_{2-1}$ , полученных методом 1 в обоих направлениях.

*Метод 3*, учитывающий неравномерность цветового пространства с помощью усреднения порога цветоразличения. В этом методе предлагается вычислять расстояние в соответствии с выражением (5), принимая порог  $\mu$  цветоразличения независимым от координат  $[x, y]$  и равным среднему значению порогов  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , полученных, соответственно, в точках 1 и 2:  $\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$ .

*Метод 4*, учитывающий неравномерность цветового пространства с помощью усреднения параметров эллипсов цветоразличения. В этом методе предлагается использовать эллипс с усредненными параметрами  $a = \frac{a_1 + a_2}{2}$ ,  $b = \frac{b_1 + b_2}{2}$  и  $\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$ , где  $a_1, b_1, \theta_1$  – параметры эллипса в точке 1;  $a_2, b_2, \theta_2$  – параметры эллипса в точке 2. Характеристики полученного эллипса используются для определения порога  $\mu$  цветоразличения для вычисления расстояния в соответствии с выражением (5).

Предложенные методы были использованы при вычислении цветовых искажений видео-

изображений, возникающих из-за сжатия кодером MPEG2 с битовой скоростью видеопотока 2 Мбит/с, для кадра № 220 видеопоследовательности «Арфа», рекомендованной Международным союзом электросвязи (МСЭ) в числе тестовых видеосюжетов. При расчете относительной погрешности приближенных методов 1–4 в качестве истинной величины цветовых искажений принималось значение, рассчитанное по формуле (3) с длиной участка разбиения  $\Delta l = 0,0001$ . Характеристики относительной погрешности приближенных методов 1–4 приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что среди всех приближенных методов метод 4 имеет наименьшее значение среднеквадратического отклонения, а метод 1 – наибольшее.

Иллюстрацией этого служат зависимости абсолютной погрешности вычисления цветовых искажений от величины цветовых искажений, представленные на рис. 3 для метода 1 и на рис. 4 – для метода 4.

Ввиду более простого вычисления величины цветовых различий приближенным методом 4 по сравнению с вычислением по формуле (3) и сравнительно небольшого среднеквадратического отклонения его результатов, целесообразно использовать метод 4, или методы на его основе, для оценки искажений в телевидении, особенно при реализации вычислений в реальном масштабе времени.

**Оптимальный метод измерения цветовых различий.** Если в выражении (3) вместо использования эллипса цветоразличения в начальной точке каждого участка  $\Delta l$  разбиения использовать эллипс с усредненными параметрами, тогда

$$d_L = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta l \cdot \sqrt{\frac{1}{a_i^2} \cos^2(\bar{\theta}_i - \alpha) + \frac{1}{b_i^2} \sin^2(\bar{\theta}_i - \alpha)}, \quad (6)$$

при этом  $\bar{a}_i = \frac{a_{i1} + a_{i2}}{2}$ ,  $\bar{b}_i = \frac{b_{i1} + b_{i2}}{2}$ ,  $\bar{\theta}_i = \frac{\theta_{i1} + \theta_{i2}}{2}$ , где  $a_{i1}, b_{i1}, \theta_{i1}$  – параметры эллипса цветоразличения в начале каждого участка разбиения  $\Delta l$  и  $a_{i2},$

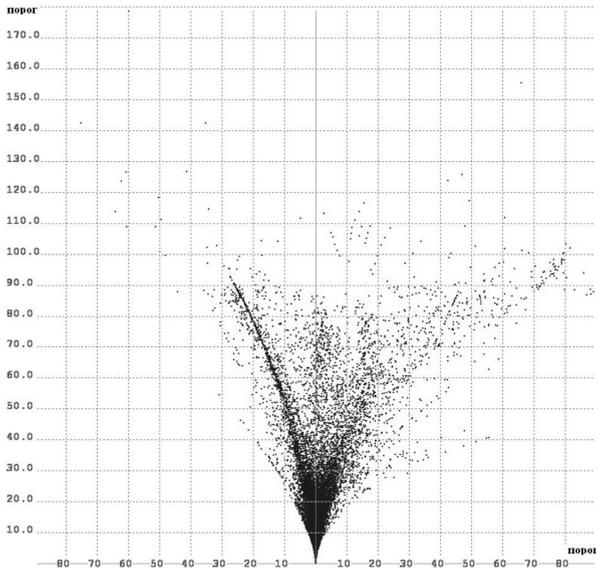


Рис. 3. Значения абсолютной погрешности метода 1 для каждого пикселя кадра

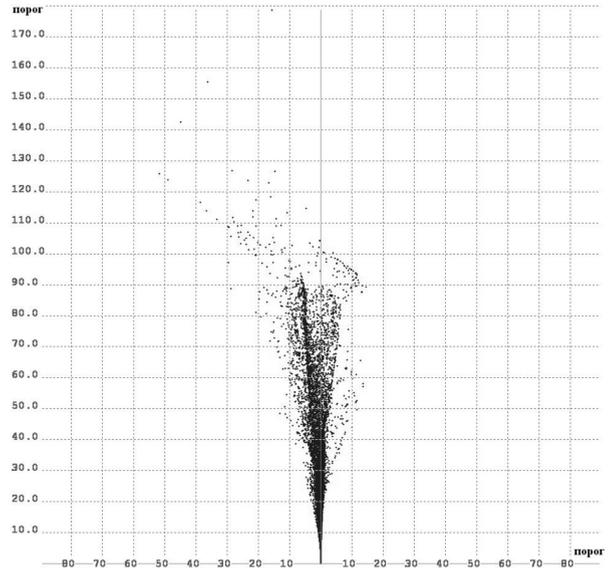


Рис. 4. Значения абсолютной погрешности метода 4 для каждого пикселя кадра

$b_{i2}, \theta_{i2}$  – параметры эллипса цветоразличения в конце каждого участка разбиения  $\Delta l$ .

На рис. 2 представлена зависимость вычисленных по формуле (6) значений величины отрезка в порогах от числа  $N$  участков его разбиения. Как видим, для достижения конечного значения длины отрезка  $1-2 d \approx 32,51$  порогов требуется значительно меньшее число участков разбиения  $N=2^4$ , чем при вычислении по формуле (3).

В приложениях, в которых точность измерений более важна, чем скорость вычисления, можно использовать метод по формуле (6), который является оптимальным по соотношению точности и объема вычислений.

**Сравнение результатов измерения предложенных методов и стандартных методов.** В настоящее время для оценки цветовых различий используются стандартные цветовые пространства *CIELUV* и *CIELAB*, рекомендованные МКО в качестве равноконтрастных пространств. Пространство *CIELUV* получено линейным преобразованием

цветового пространства МКО *XYZ*, а пространство *CIELAB* – нелинейным преобразованием.

В табл. 3 представлены вычисленные значения цветового различия между точками 1 и 2 (см. табл.1) и относительные погрешности предложенных приближенных методов и стандартных методов *CIELUV* и *CIELAB*, при этом в качестве истинной величины цветовых искажений принималось значение, рассчитанное по формуле (3) с длиной участка разбиения  $\Delta l = 0,0001$ .

Предложен новый подход к измерению цветовых различий, применяемый непосредственно в неравноконтрастном пространстве и отличающийся отсутствием преобразования этого пространства в равноконтрастное.

В рамках нового подхода предложены прикладные методы измерения цветовых различий, основанные на модели цветовосприятия зрительной системой человека и учитывающие неравномерность цветового пространства.

Таблица 3

Значения цветового различия между точками 1 и 2.  
Относительная погрешность методов

	Приближенные методы				Метод <i>CIELUV</i>	Метод <i>CIELAB</i>
	1	2	3	4		
Цветовое различие, порог	28,62 или 39,09	33,85	33,04	32,78	44,74	34,62
Относительная погрешность	-0,12 или 0,20	0,04	0,02	0,008	0,38	0,06

Рассчитаны характеристики относительной погрешности предложенных методов.

Согласно результатам расчета цветовых искажений кадра тестовой видеопоследовательности, для реализации вычислений в реальном времени целесообразно использовать приближенный метод 4 с усреднением параметров эллипсов цвето-различения, или методы на его основе.

В приложениях с менее жесткими требованиями к скорости вычисления рекомендуется использовать метод по формуле (6), который является оптимальным по соотношению точности и объема вычислений.

Необходимо дальнейшее исследование влияния анизотропии пространства МКО  $XYZ$  на измерение цветовых различий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Малыхина, Г.Ф.** Разработка новых моделей цветовосприятия зрительной системой человека [Текст] / Г.Ф. Малыхина, И.А. Со // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации.

Управление. – 2007. – № 5. – С. 145–151.

2. **Мешков, В.В.** Основы светотехники. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия [Текст] / В.В. Мешков, А.Б. Матвеев. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

УДК 681.3

*В.Г. Чердниченко, А.А. Цуприков*

## ВОЗНИКНОВЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЕ

Как показывает практика, при бурении скважин в определенных случаях возникает вибрация бурильной колонны, которая отрицательно сказывается на износе бурильного оборудования. Самоподдерживающийся тип вибрации указывает на автоколебательный характер этого процесса, при котором потери энергии крутильных колебаний на диссипацию восполняются за счет взаимодействия долота с забоем скважины.

Представим колонну как однородный вращающийся полый стержень, верхний конец которого  $x = L$  вращается с постоянной угловой скоростью  $v_0$ , а нижний конец ( $x = 0$ ) взаимодействует с забоем посредством массивного долота. В результате этого взаимодействия в колонне возникают крутильные деформации, носящие колебательный характер. В дальнейшем колонну удобно рассматривать в системе отсчета неподвижной относительно ее верхнего конца. В этой системе верхний конец колонны неподвижен, а на нижний конец (долото) действует вращающая сила со скоростью  $v_0$  в направлении, обратном поверхности контакта (забой). Момент силы взаимодействия долота с горной породой имеет сложный характер, зависящий от

$v - v_0$  – относительной скорости скольжения долота по забою. Качественно эту зависимость можно считать аналогичной сухому трению (рис. 1). Наибольшего по модулю значения  $f_0$  силы трения достигают при относительной скорости равной нулю. С началом скольжения силы трения убывают до постоянного значения  $f_1$ . Это убывание, играющее в описываемом явлении главную роль, можно объяснить разрыхлением породы при увеличении относительной скорости скольжения зубьев долота по забою. В момент, когда относительная скорость  $v - v_0$  меняет знак, сила



Рис. 1. Зависимость момента силы от относительной скорости

трения также изменяет направление, что отражено в разрыве графика. Левая ветвь в окрестности разрыва соответствует стадии, когда зубья долота догоняют поверхность. В момент, когда их скорости уравниваются, поверхность «подхватывает» долото, сообщая ему дополнительную порцию кинетической энергии. Правая ветвь соответствует стадии, когда зубья долота обгоняют поверхность контакта. В этом случае сила трения противодействует движению, приводя к диссипации избыточной энергии. Сочетание инерции и упругости колонны на скручивание обеспечивает колебательный характер деформации колонны, а описанный характер трения приводит к дозированному подводу энергии, который регулируется самой системой. Поступающая в систему энергия компенсирует потери за счет диссипации в системе, приводя к установлению самоподдерживающихся автоколебаний.

От качественного описания перейдем к математической модели процесса. Элемент колонны  $\delta x$  имеет площадь поперечного сечения  $S$  и момент инерции  $\delta I = \delta x \rho I_s$ , где  $\rho$  – плотность материала колонны;  $I_s = \int r^2 ds$  – полярный момент сечения. Здесь  $ds$  – площадь элемента сечения, удаленного от оси колонны на расстояние  $r$ . Обозначим угол поворота сечения с координатой  $x$  в момент времени  $t$  как  $u(x, t)$ . На сечение со стороны участка, расположенного выше, действует момент упругой силы  $M_e = -GI_s e$ , где  $G$  – модуль сдвига;  $e = \frac{\partial u}{\partial x}$  – относительная деформация. Кинетическая энергия системы состоит из кинетической энергии, распределенной вдоль колонны и энергии вращения долота [2]:

$$W_k = \int \frac{\dot{u}^2}{2} \delta I + I_0 \frac{\dot{u}_0^2}{2} = \frac{\rho I_s}{2} \int_0^L \dot{u}^2 \delta x + I_0 \frac{\dot{u}_0^2}{2}, \quad (1)$$

где  $I_0$  – момент инерции долота;  $\dot{u}_0$  – угловая скорость в точке  $x = 0$ .

Получим выражение для потенциальной энергии деформации стержня. При деформации элемента стержня  $\delta x$  на величину  $du = de \delta x$  приращение потенциальной энергии равно  $dW_p = -M_e du = -M_e de \delta x = GI_s e de \delta x$ . Потенциальная энергия этого элемента равна  $\delta W_p = GI_s \int_0^e e de \delta x = GI_s \frac{e^2}{2} \delta x$ , а всего стержня

$$W_p = \frac{GI_s}{2} \int_0^L e^2 \delta x. \quad (2)$$

Подействуем на нижний конец стержня моментом силы, вызывающей деформацию нижнего конца  $u(0) = u_0$ . Верхний конец будем считать закрепленным  $u(L) = 0$ .

При условии статической деформации по всей длине стержня выполняются условия:

$$M_e = \text{const}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \text{const}. \quad (3)$$

С учетом граничных условий, находим

$$u(x) = u_0 \left( 1 - \frac{x}{L} \right), \quad e = -\frac{u_0}{L}.$$

В дальнейшем будем рассматривать упрощенную модель процесса, которая приводит к системе с одной степенью свободы. Будем считать, что деформация стержня развивается во времени в квазистатическом режиме и условия (3) попрежнему выполнены, тогда:

$$u(x, t) = u_0(t) \cdot \left( 1 - \frac{x}{L} \right), \quad e = -\frac{u_0(t)}{L}, \quad (4)$$

$$\dot{u} = \dot{u}_0 \cdot \left( 1 - \frac{x}{L} \right).$$

Подставив выражения (4) в равенства (1) и (2) и произведя интегрирование, получим полную энергию:

$$W = W_k + W_p = I_{\text{эфф}} \frac{\dot{u}_0^2}{2} + p \frac{u_0^2}{2}. \quad (5)$$

Здесь  $I_{\text{эфф}}$  и  $p$ , соответственно, эффективный момент инерции и крутильная жесткость системы:

$$I_{\text{эфф}} = \frac{\rho I_s L}{3}, \quad p = \frac{GI_s}{L}. \quad (6)$$

Согласно закону сохранения механической энергии, производная по времени от полной энергии равна мощности внешней силы  $W = I_{\text{эфф}} \ddot{u}_0 \dot{u}_0 + p u_0 \dot{u}_0 = M \dot{u}_0$ , откуда приходим к уравнению колебаний (индекс «0» у  $u_0$  опускаем):

$$\ddot{u} + \omega_0^2 u = f(\dot{u} - v_0), \quad (7)$$

где  $\omega_0^2 = \frac{3G}{\rho L^2}$ ,  $f = \frac{M}{I_{\text{эфф}}}$ . (8)

Уравнение (7) является нелинейным, вследствие нелинейной правой части. Произведем линеаризацию в окрестности значения  $\dot{u} = \dot{\bar{u}}$ :

$$f = f(\dot{\bar{u}}) + 2B \cdot (\dot{\bar{u}} - v_0). \quad (9)$$

В результате получим:

$$\ddot{u} - 2B\dot{u} + \omega_0^2 u = f_s, \quad (10)$$

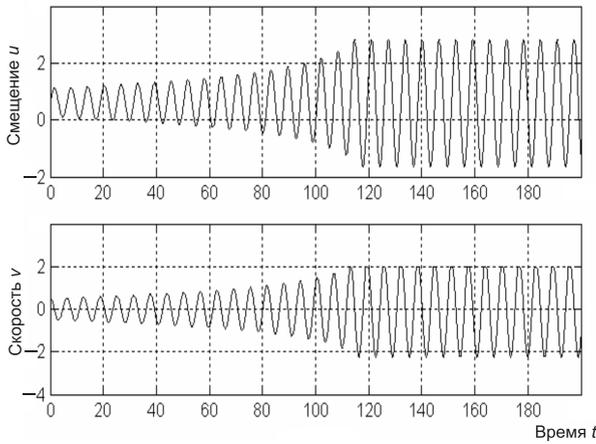


Рис. 2. Зависимость смещения и скорости от времени в переходном и стационарном режимах

где  $B = \frac{1}{2} \frac{\partial f(y)}{\partial y} \Big|_{y = \dot{u} - v_0}$ ,  $f_s = f(\dot{u}) - 2Bv_0$ .

Общее решение линеаризованного уравнения имеет следующий вид:

$$u = \frac{f_s}{\omega_0^2} + Ae^{Bt} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (11)$$

где  $\omega^2 = \omega_0^2 - B^2$ . Это выражение показывает, что в линейном приближении амплитуда колебаний экспоненциально возрастает благодаря условию  $B > 0$ .

Выражение (9) подсказывает, каким способом можно бороться с нежелательными автоколебаниями. Для этого следует включить в конструкцию демпфирующий элемент, который обеспечивал бы в выражении для момента силы  $f$  диссипативные члены вида  $-2\beta\dot{u}$ ;  $-\gamma\dot{u}|\dot{u}|$  и т. п. В случае первого из них, например, вместо уравнения (10) будет иметь место уравнение  $\ddot{u} + 2(\beta - B)\dot{u} + \omega_0^2 u = f_s$ , которое приводит к затуханию колебаний при условии  $\beta > B$ . В роли демпфирующего элемента может выступать глинистый раствор буровой жидкости, прокачиваемый в достаточном количестве через колонну.

Рассмотрим уравнение (10) с начальным условием  $u(0) = u_0$ ,  $\dot{u}(0) = \dot{u}_0 < v_0$ . Согласно выражению (10), зависимость  $u(t)$  представляет собой колебание относительно положения равновесия  $\frac{f_s}{\omega_0^2}$  с возрастающей амплитудой. Возрастание будет продолжаться до тех пор, пока не начнет выполняться условие  $\dot{u} - v_0 = 0+$ , когда линеаризация (9) становится неприменимой. В этот момент сила сопротивления изменяет направление (правая часть графика на рис. 1), и переходной режим резко

сменяется стационарным режимом автоколебаний, при котором амплитудное значение скорости поддерживается на постоянном уровне  $\dot{u}_{\max} \approx v_0$ . Из этого равенства получаем оценку амплитуды автоколебаний  $u \approx u_0 + A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ;  $\dot{u} \approx -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ , откуда

$$A \approx \frac{v}{\omega_0}. \quad (12)$$

От априорных оценок перейдем к численному моделированию. Перейдем к безразмерным переменным:

$$\tilde{t} = t\omega_0; \quad \tilde{u} = \frac{u\omega_0^2}{f_0}; \quad \tilde{\dot{u}} = \frac{\dot{u}\omega_0}{f_0}; \quad \tilde{v}_0 = \frac{v_0\omega_0}{f_0}. \quad (13)$$

Уравнение (7) в этих переменных принимает следующий вид:

$$\ddot{\tilde{u}} + \tilde{u} = \tilde{f}(\tilde{u} - \tilde{v}_0). \quad (14)$$

Обобщенную силу зададим в следующем виде:

$$\tilde{f}(u) = -\text{sign}(u) \left( f_0 + (f_1 - f_0) \exp(-\lambda|u|) \right), \quad (15)$$

с коэффициентами  $f_0 = 1, f_1 = 0,6, \lambda = 2$  (см. рис. 1), безразмерная скорость  $v_0 = 2$ . Уравнение (12) решалось численно методом Рунге–Кутты 4–5 порядка с автоматическим выбором шага с максимальной относительной погрешностью  $10^{-6}$  [1]. На рис. 2 показаны зависимости углового отклонения и скорости от времени. Из рисунка, а также в результате обработки полученных данных следует, что качественные соображения на основе линеаризованной модели подтверждаются с хорошей точностью.

На рис. 3 представлена фазовая диаграмма колебаний для двух начальных условий. Цифрой 1 обозначили начальное состояние, при котором долото «догоняет» поверхность контакта, при этом возрастает амплитуда колебаний; 2 – состояние,

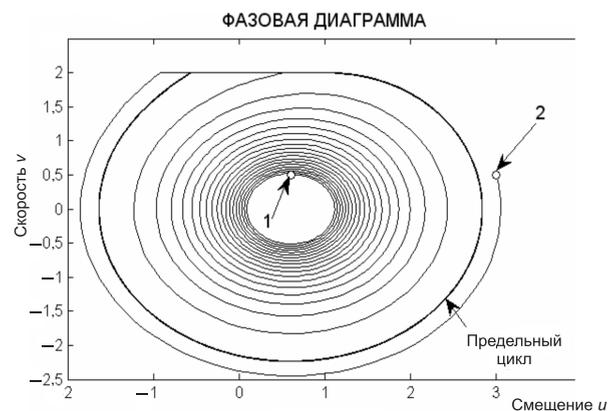


Рис. 3. Фазовая траектория автоколебаний

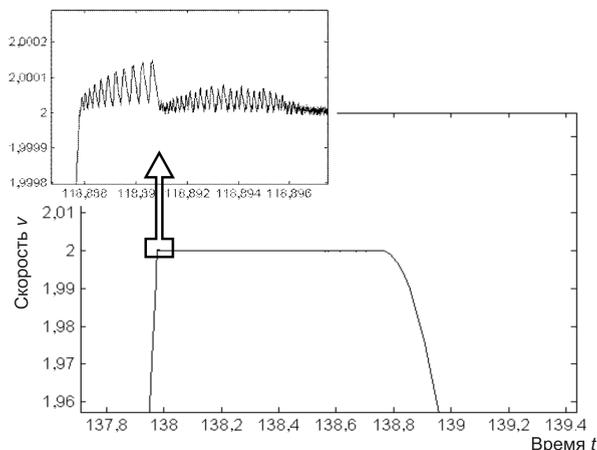


Рис. 4. Верхняя часть пиков скорости в установившемся режиме

соответствующее колебаниям с заведомо большой амплитудой скорости, которая, уменьшаясь, стремится достичь скорости контакта. Обе фазовые траектории стремятся к предельному циклу, соответствующему установившимся автоколебаниям. Этот цикл имеет вид эллипса со срезанной верхушкой, что говорит о квазигармоничности колебаний. Плоская верхушка указывает на обрезание скорости на уровне скорости поверхности контакта, что соответствует дозированному подводу энергии, типичному для автоколебаний.

Этот процесс гашения избыточной скорости

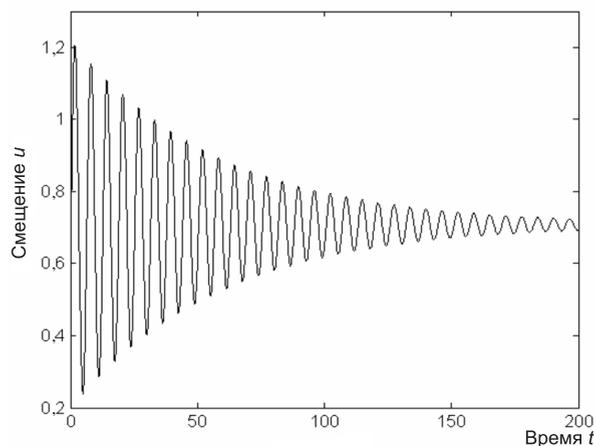


Рис. 5. Гашение колебаний демпфирующей силой  $f_D = 2\beta\dot{u}$ , где  $\beta = 0,05$

более подробно показан на рис. 4. Видно, что пики скорости в установившемся режиме имеют плоские вершины, которые при большем увеличении представляются заполненными высокочастотными колебаниями, приводящими к диссипации избыточной энергии. Эти колебания происходят вблизи вертикальной части графика, изображенного на рис. 1, т. е. при  $\dot{u} = v_0$ .

Рис. 5 демонстрирует затухание колебаний системы, в которой наряду с силой (13) действуют демпфирующие элементы, обеспечивающие необходимую диссипацию энергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, Е.Р. MATLAB 7 [Текст]/Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова.–М.: НТ-Пресс, 2006.–44с.
2. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов [Текст]/Б.М. Яворский,

А.А. Детлаф, А.К. Лебедев.–М.: Оникс; Мир и Образование, 2008.–8-е изд., перераб. и испр.–1056 с.

УДК 004.896; 519.876.5

К.А. Аксенов, Ван Кай

### ЗАДАЧА СВЕРТКИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ

Методы моделирования мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР) часто сталкиваются с объектами, в которых количество элементов составляет сотни, а то и тысячи. Для моделирования таких объектов требуется все больше вычислительных ресурсов и машинного

времени. В связи с этим актуально выявление и использование новых принципов для построения МППР – их оптимизация с помощью процедур сверток моделей, позволяющих сократить время эксперимента и сделать имитационную модель (ИМ) менее ресурсоемкой.

### Задачи анализа и синтеза

Анализ ИМ связан с выделением (декомпозицией) некоторых свойств из всей совокупности свойств, характеризующих модель. ИМ МППР в своем первоначальном виде не может быть использована для аналитического исследования процесса свертки (процесса синтеза), т. к. такая модель не содержит в явном виде искомым величин (пригодность элементов модели к свертке, изменение точности расчетов при свертке, влияние свертки на время эксперимента, а также дополнительной информации по статистике работы модели (динамическим характеристикам элементов модели)). Поэтому ИМ МППР первоначально необходимо преобразовать в новую систему соотношений, которая включает в себя искомые величины. Такая система соотношений реализуется с помощью графа образа модели – совокупности элементов МППР и связей между ними, представленная топологическим графом и формализованная путем использования теории графов. В дальнейшем граф образа модели будем обозначать как  $G$ . Образ модели является развитием модели МППР, отражающим ее композицию с помощью следующих действий:

выявление элементов модели МППР;

описание связей между элементами модели МППР.

Цели создания образа модели МППР:

исследование модели МППР;

поиск оптимальных вариантов проведения свертки, т. е. поиск такого построения модели МППР, которое позволит снизить время эксперимента за счет упрощения структуры модели и связей между ее структурными элементами, не выходящего за рамки заданной точности.

В качестве основных методов исследования модели МППР, позволяющих произвести упрощение структуры модели, будут использоваться системный анализ и синтез.

#### Модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов (МППР)

При проведении системного анализа (СА) ОТС обычно описывают следующие составляющие: миссию, видение, стратегии, процессы. Применение теории МППР позволяет по-новому взглянуть на ОТС с точки зрения динамических систем, основанных на знаниях.

Динамическая модель дискретного процес-

са преобразования ресурсов была разработана К.А. Аксеновым и Б.И. Клебановым [1] на основе следующих математических схем: сетей Петри, систем массового обслуживания, моделей системной динамики. В дальнейших исследованиях [2] данная модель была взята за основу и расширена интеллектуальными агентами (ИА, моделями ЛППР). В результате создания модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов была решена задача интеграции имитационного, экспертного, ситуационного и мультиагентного моделирования.

Основными объектами агентной модели МППР являются: операции ( $Op$ ), ресурсы ( $RES$ ), заявки ( $Order$ ), команды управления ( $U$ ), средства ( $MECH$ ), процессы ( $PR$ ), источники ( $Sender$ ) и приемники ресурсов ( $Receiver$ ), перекрестки ( $Junction$ ), параметры ( $P$ ), агенты ( $Agent$ ) и коалиции ( $Coalition$ ). Описание причинно-следственных связей между элементами преобразования и ресурсами задается объектом «связь» ( $Relation$ ). Существование агентов предполагает наличие ситуаций ( $Situation$ ) и решений ( $Decision$ ).

Агенты управляют объектами МППР. Агент выполняет следующие действия:

анализирует внешние параметры (текущую ситуацию);

диагностирует ситуацию, обращается к БЗ, в случае определения соответствующей ситуации пытается найти решение (сценарий действий) в БЗ или выработать его самостоятельно;

вырабатывает (принимает) решение;

определяет (переопределяет) цели;

контролирует достижение целей;

делегировать цели своим и чужим объектам процесса преобразования, а также другим агентам;

обменивается сообщениями – элементы МППР участвуют в обмене сообщениями и на основе своих моделей поведения выполняют свои преобразовательные функции, руководствуясь поступающими сообщениями.

Для построения ядра моделирующей системы был использован аппарат продукционных систем:

$$PS = \langle Rps, Bps, Ips \rangle, \quad (1)$$

где  $Rps = \{RES(t)\} \cup \{Order(t)\} \cup \{MECH(t)\} \cup \{U(t)\} \cup \{G(t)\}$  – текущее состояние ресурсов, заявок, средств, команд управления, целей (рабочая память);  $Bps$  – множество правил преобразования ресурсов и действий агентов (база знаний);

*Ips* – машина вывода, состоящая из планировщика и машины логического вывода по БЗ агентов.

Алгоритм имитатора состоит из следующих основных этапов: определения текущего момента времени  $SysTime = \min(T_j), j \in RULE$ ; обработки действий агентов; формирования очереди правил преобразования; выполнения правил преобразования и изменения состояния рабочей памяти. Для диагностирования ситуаций и выработки команд управления имитатор обращается к модулю экспертной системы.

Таким образом, в ходе проведения СА рассмотрение ОТС в виде МППР позволяет также уделить внимание следующим элементам: моделям ЛПР, их знаниям, моделям поведения (процессам принятия решений); моделям координации и взаимодействия агентов; динамической составляющей процессов; рассмотрению отношений миссии, видения, стратегий, целей, ключевых показателей деятельности (параметров) и мероприятий (процессов) с помощью методики BSC.

### Постановка задачи свертки модели МППР

*Свертки* – процедуры структурного и/или параметрического синтеза модели, которая ведет к уменьшению структуры и/или параметров модели, представляющие собой один из инструментов агрегирования информации. Элементарный акт реализации свертки имеет следующий вид:

$$SM \xrightarrow{Sv(i)} TM, \quad (2)$$

где  $SM$  – исходная модель МППР;  $TM$  – свернутая модель МППР;  $Sv(i)$  – элементарная свертка как способ воздействия на  $SM$ .

Разработка алгоритмов сверток ведется в трех направлениях: поэлементный анализ составляющих модели дискретного процесса преобразования (не включающей в себя агентов); совершенствование алгоритма ИМ МППР; синтез баз знаний ИА.

При исследовании ИМ МППР, подлежащей свертке, решаются следующие задачи системного анализа.

1. Определение топологии и свойств модели МППР путем составления ее графового образа  $G$ . Таким образом, граф образа  $G$  выступает в качестве структурной модели.

2. Оценка пригодности элементов модели к свертке.

3. Исследование диапазона точности расчетов, в рамках которых имитационная модель сохраняет устойчивость и целостность.

4. Оценка степени реализации множеств сверток в системе целей.

5. Выбор одного или нескольких вариантов свертки для практической реализации, критерием выбора является решение задачи:

$$T_{\text{эксп}}(x) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $T_{\text{эксп}}$  – время эксперимента;  $x$  – количество элементов модели МППР.

При анализе ИМ с помощью ее графа  $G$  образа модели исследуется влияние изменений в топологии имитационной модели за счет применения процедур свертки на способность модели сохранять свою работоспособность (выполнять расчеты с заданной точностью).

### Синтез модели МППР

Синтез ИМ МППР решает следующие задачи.

1. Исследование некоторого количества вариантов осуществления процедур свертки, которые приводят к изменению топологии ИМ и таких параметров модели, как точность расчетов и время эксперимента.

2. Выбор эффективного, с точки зрения задачи принятия решений, варианта свертки модели как результат вышеназванного анализа.

На рис. 1 показан принцип применения сверток в виде графа высокого уровня интеграции [3],

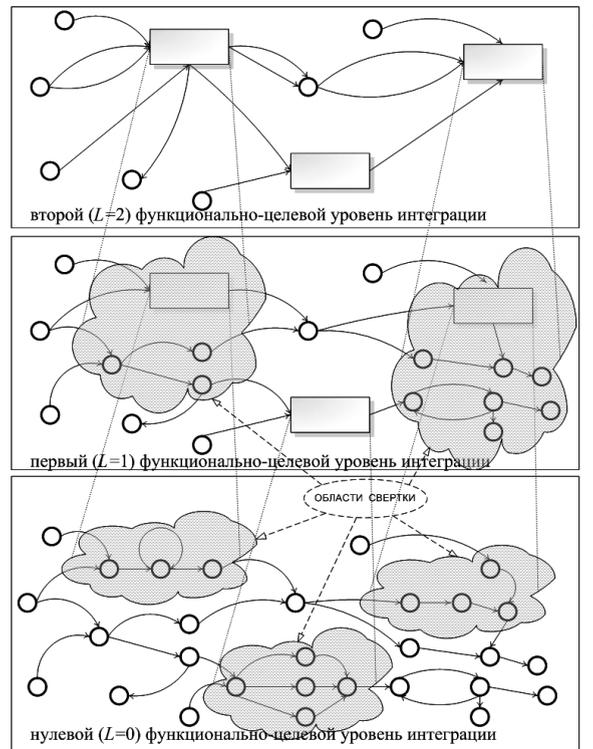


Рис. 1. Процесс синтеза модели МППР

в отличие от модели МППР, которая строится на этапе СА, переходы к более высоким уровням интеграции осуществляются в обратном направлении посредством применения к модели процедур свертки.

Основываясь на указанном выше принципе, целесообразно сопоставить каждому элементу процесса преобразования ресурсов определенный элемент графа.

1. Операциям процессов преобразования ресурсов ставятся в соответствие вершины графа  $Op(G)$ . Через  $Op_i^{SV}$  обозначим операцию процесса преобразования ресурсов, входящую в свертку  $Op_i^{SV} \in Op^{SV}(G) \in Op(G)$ ,  $Op^{SV}(G) \leq Op(G)$ . Количество вершин  $Op(G)$  графа  $G$  обозначим как  $|Op(G)| = n_o$ .

2. Ресурсам ставятся в соответствие вершины графа  $Res(G)$ . Количество вершин  $Res(G)$  графа  $G$  обозначим как  $|Res(G)| = n_r$ .

3. Средствам преобразования ресурсов ставятся в соответствие вершины графа  $Mech(G)$ . Количество вершин  $Mech(G)$  графа  $G$  обозначим как  $|Mech(G)| = n_m$ .

4. Совокупность вершин  $Op(G)$ ,  $Res(G)$  и  $Mech(G)$  определяют порядок графа образа мо-

дели  $G: |V(G)|=n$ , где  $V(G) = |Op(G)| + |Res(G)| + |Mech(G)|$ .

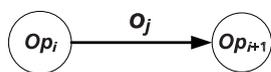
5. Связям между операциями ставятся в соответствие ребра графа  $O(G)$ . Количество ребер  $O(G)$  графа  $G$  обозначим как  $|O(G)| = m_o$ . Переходы между операциями бывают следующих видов: последовательные и с обратной связью (рис. 2 а, б).

6. Связям между операциями и ресурсами ставятся в соответствие ребра графа  $R(G)$ , которые, с учетом их направленности, представляют собой процессы расхода или пополнения ресурсов (рис. 2 в). При этом ребра с нечетными индексами  $r_i \in R(G)$ , направленные от  $Res_k$  к  $Op_l$ , обозначают процесс потребления ресурса  $Res_k$ . Ребра с четными индексами  $r_{i+1} \in R(G)$ , направленные от  $Op_l$  к  $Res_k$ , обозначают процесс пополнения ресурса  $Res_k$ . Количество ребер  $R(G)$  графа  $G$  обозначим как  $|R(G)| = m_r$ .

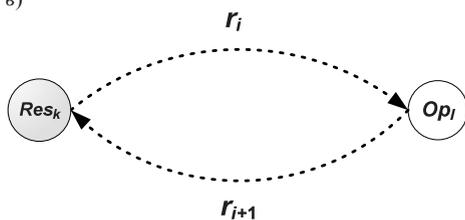
С целью упрощения графического представления и улучшения воспринимаемости, для образов модели будем использовать форму графического представления процесса взаимодействия с ресурсами, представленную на рис. 2 г.

7. Связям между операциями и средствами

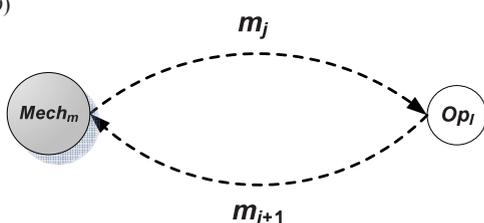
а)



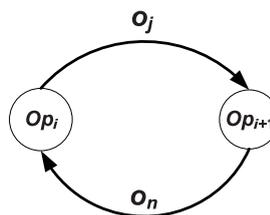
в)



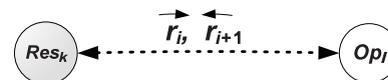
д)



б)



г)



е)

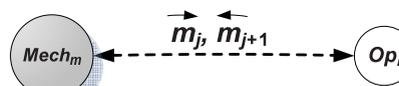


Рис. 2. Виды взаимодействий  $Op(G)$ ,  $Res(G)$ ,  $Mech(G)$ :

- а – последовательный переход; б – обратная связь; в – взаимодействие операции с ресурсом в общем виде; г – графическое представление взаимодействия операции и ресурса;
- д – взаимодействие операции и средства в общем виде; е – графическое представление взаимодействия операции со средством

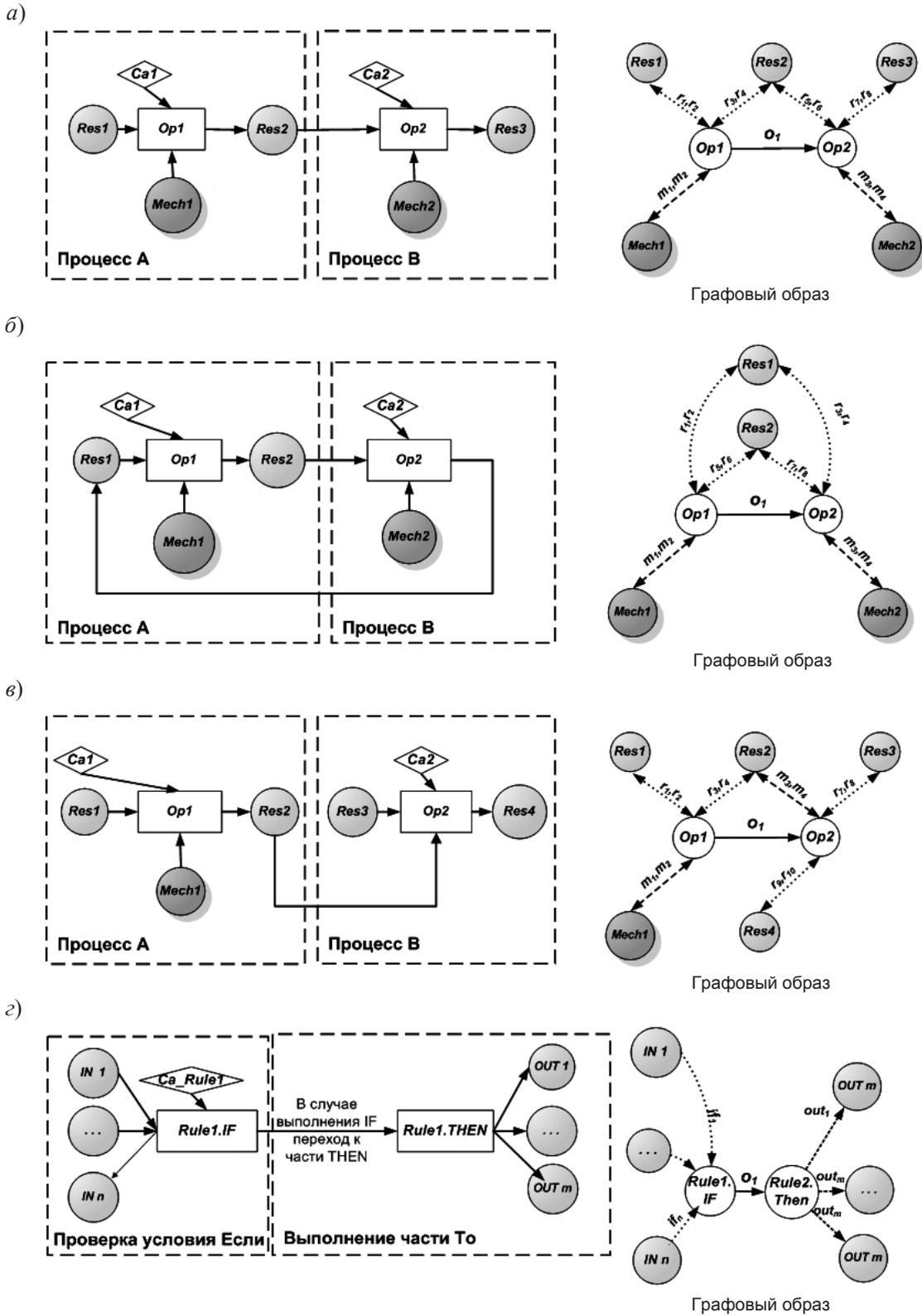


Рис. 3. Графовый образ взаимосвязи операций «выход–средство»:  
а – взаимосвязь операций по входу; б – обратная связь операций по входу;  
в – взаимосвязь операций «выход–средство»; г – правило агента

преобразования ресурсов ставятся в соответствие ребра графа  $M(G)$ , которые с учетом их направленности представляют собой процессы захвата или высвобождения средств преобразования ресурсов (рис. 2 д).

При этом ребра с нечетными индексами  $m_j \in M(G)$ , направленные от  $Mech_j$  к  $Op_p$  обозначают процесс захвата  $Mech_i$ . Ребра с четными индексами  $m_{j+1} \in M(G)$ , направленные от  $Op_i$  к  $Mech_j$ , обозначают процесс высвобождения  $Mech_j$ . Количество ребер  $M(G)$  графа  $G$  обозначим как  $|M(G)| = m_m$ . Для образа модели будем использовать форму графического представления процесса взаимодействия со средствами преобразования ресурсов, представленную на рис. 2 е.

8. Совокупность ребер  $O(G)$ ,  $R(G)$  и  $M(G)$  определяет *размерность* графа  $G$  образа модели:  $|E(G)| = m$ , где  $|E(G)| = |O(G)| + |R(G)| + |M(G)|$ .

Рассмотрим особенности графового представления модели МППР при различных типах взаимосвязи между элементами процесса.

*Взаимосвязь по входу.* При такой взаимосвязи выход некоего процесса  $A$  является входом для другого процесса  $B$  (рис. 3 а).

*Обратная связь по входу.* При данной взаимосвязи выход из одного процесса  $A$  является входом для другого процесса  $B$ , выход которого служит для процесса  $A$  входом (рис. 3 б).

*Взаимосвязь «выход-средство».* При подобной взаимосвязи выход одного процесса  $A$  является средством преобразования ресурсов для другого процесса  $B$  (рис. 3 в). В данном случае элемент графа  $Res_2$  выполняет также функцию средства, т. к. объект  $Res_2$  может использоваться другими операциями не только как входной ресурс, но и как средство преобразования ресурса.

*Производственные правила агентов МППР.* В графической нотации МППР агенту соответствует 1 блок. Функционально агент содержит базу производственных правил. В графическом виде 1 производственное правило представлено на рис. 3 г. Входам и выходам правил соответствуют условия и действия, связанные с состоянием ресурсов, средств, заявок, операций.

### Правила сворачиваемости графа образа модели

Введем следующие определения.

*Область свертки* – множество процессов преобразования ресурсов, к которым применяются процедуры свертки.

*Пограничные процессы преобразования ресурсов* – множество процессов преобразования ресурсов, принадлежащих области свертки и связанные какими-либо отношениями с процессами преобразования ресурсов, расположенными вне области свертки.

Сформулируем основные принципы сворачиваемости графа  $G$  образа модели.

1. Свертке подлежат только элементы  $Op_i^{SV} \in Op^{SV}(G) \in Op(G)$ ,  $Op^{SV}(G) \leq Op(G)$ , выявленные на этапе анализа модели согласно следующим правилам;

две и более параллельные операции с одинаковой структурой (перечнем) входных и выходных ресурсов и заявок, а также средств, если статистика загрузки показывает их значительную недозагрузку (простой). Количество сворачиваемых операций и их состав определяется из статистики загрузки. Данная задача сводится к выбору операций, которые останутся в модели и которые будут свернуты в модели.

две и более последовательные операции сворачиваются в одну операцию при следующих условиях: потоки ресурсов, заявок и средств внутри цепи (последовательности операций) не связаны с другими операциями модели или не оказывают влияния на выполнение других операций; при выполнении цепи операций нет простоев (в жизни возможны две ситуации – когда идет бесперебойная работа конвейера и когда система работает без задержек в выполнении операций (в случае прихода заказа включается конвейер).

2. В одну процедуру свертки могут входить только смежные элементы  $Op_i^{SV} \in Op^{SV}(G) \in Op(G)$ ,  $Op^{SV}(G) \leq Op(G)$ . К данным случаям относятся или цепочки операций, или параллельные цепи операций.

3. Элементы  $Mech_i \in Mech(G)$  и  $Res_i \in Res(G)$  сворачиваются только в тех случаях, когда они в избытке или в достаточном количестве для бесперебойной работы системы (отсутствуют простои операций, связанные с ожиданием высвобождения средств преобразования либо пополнения ресурса) на протяжении всего интервала времени моделирования для определенного диапазона входных параметров. В остальных случаях их свертка не допускается.

4. Агенты МППР имеют производственную базу знаний. Количество правил в базе знаний оказывает значительное влияние как на скорость работы алгоритма машины логического вывода, так

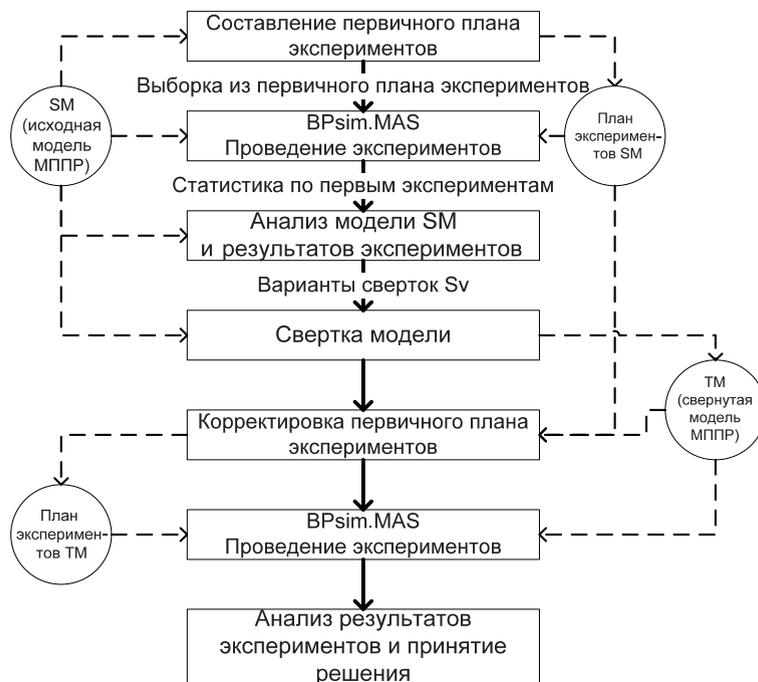


Рис. 4. Общая схема ИМ при использовании свертки модели

и (как следствие) на работу ядра имитационного моделирования (системы динамического моделирования ситуаций (СДМС) BPsim.MAS). Сжатие базы правил агента МППР происходит в следующих случаях.

В результате пересмотра изменения структуры модели (изменения ресурсов, средств, заявок, операций) происходит корректировка частей «Если ...» и «То ...» продукций. Если в результате изменения правила посылка становится пустой, то полностью удаляется правило. В случае, когда отдельная (отдельно выполняемая) часть следствия становится пустой, вся отдельная часть следствия удаляется. В случае, когда все отдельные части следствия становятся пустыми, удаляется все правило.

Удаляем правила, если в серии экспериментов на всем интервале модельного времени выявлены ни разу не выполненные правила (на основе результатов анализа статистики работы модели). В случае, если правило могло быть выполнено, но не было принято к исполнению в результате разрешения конфликта, данное правило свертке не поддается.

5. В силу того, что коалиции формируются в процессе объединения агентов в ходе имитационного моделирования, свертка правил агентов

происходит в результате их объединения в агента коалиции.

На рис. 4 представлена блок-схема построения свернутой модели, которая может служить основой для подготовки соответствующей программной реализации.

Полученные решения положены в основу подходов системного анализа и синтеза, проектирования и динамического моделирования МППР, а также технико-экономического проектирования, поддержки бизнеса и принятия решений.

Данные подходы реализуются в специализированных пакетах семейства BPsim [www.bpsim.ru](http://www.bpsim.ru), обеспечивающих поддержку [4–5]: диалогового создания структурной модели процесса преобразования и формализации модели конкретной предметной области; построения динамической модели; проведения имитационных экспериментов с их последующим анализом; выработки эффективных управленческих решений на предприятиях; технико-экономического проектирования мультисервисных сетей связи; проектирования ПО поддержки бизнеса и принятия решений.

Работа выполнена в рамках госконтракта 02.740.11.0512.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аксенов, К.А.** Имитационное моделирование процессов преобразования ресурсов: Монография [Текст]/К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов.–Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008.–198 с.
2. **Аксенов, К.А.** Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов: Монография [Текст]/К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова.–Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006.–311 с.
3. **Аврамчук, Е.Ф.** Технология системного моделирования [Текст]/ Е.Ф. Аврамчук [и др.]; Под общ. ред. С.В. Емельянова.–М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988.–520 с.
4. **Аксенов, К.А.** Интеллектуальная система моделирования «BPSIM.MSS» и объектно-структурный метод технико-экономического проектирования мультисервисных сетей связи [Текст]/К.А. Аксенов// Вестник компьютерных и информационных технологий.–М., 2010.–№ 8.–С. 19–27.
5. **Аксенов, К.А.** Модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов и системный анализ организационно-технических систем [Текст]/К.А. Аксенов// Вестник компьютерных и информационных технологий.–М., 2009.–№ 6.–С. 38–45.

УДК 004.032.26+519.63:517.951

*А.Н. Васильев, Ф.В. Порубаев, Д.А.Тархов*

## НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

Данная публикация продолжает исследования в области применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для построения математических моделей систем с распределенными параметрами [1–6], описываемых задачами для уравнений с частными производными. Предлагаемая методика применима как в случае классических постановок подобных задач, так и в случае некорректно поставленных задач. Пример такой некорректной задачи – двумерное по пространственным переменным уравнение теплопроводности, в котором вместо начального условия дан набор точечных данных, известных с некоторой погрешностью. А.А. Самарский и П.Н. Вабищевич [7] строили регуляризацию решения такой задачи посредством восстановления начальных условий (при заданных краевых условиях) по набору точечных данных (задача управления). При предлагаемом нейросетевом подходе решение как прямой, так и обратной задачи строится единообразно. Такая задача в одномерном случае успешно решена в [4] с помощью ИНС, данное исследование является обобщением этой задачи на двумерный случай.

**Постановка задачи.** Поиск решения  $U(x, y, t)$  уравнения теплопроводности двумерного по пространственным переменным: 
$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$$

в области  $\Omega: 0 < x < 1; 0 < y < 1; 0 < t < T$ . Граничные условия – однородные условия Дирихле:  $U(0, y, t) = U(1, y, t) = U(x, 0, t) = U(x, 1, t) = 0$ . Однако начальное условие отсутствует, вместо него дан набор «экспериментально измеренных» (например, данные с датчиков) значений функции в некоторых точках:  $U(x_j, y_j, t_j) = f_j, j = 1, \dots, N_d$ . Точки  $(x_j, y_j, t_j)$  также принадлежат указанной области  $\Omega$ . Предполагается, что данные  $f_j$  известны с некоторой погрешностью.

Исследование возможностей рассматриваемого нейросетевого подхода можно разделить на следующие этапы.

- Выбор начального условия  $U(x, y, 0) = \varphi(x, y)$  и получение аналитического решения  $U_a(x, y, t)$ .

- Генерация значений  $f_j$  (которые являются «зашумленными» значениями полученной выше функции  $U_a(x, y, t)$  в некотором наборе точек).

- Решение исходной задачи и сравнение полученного приближенного решения с аналитическим.

Такое исследование позволяет оценить возможности метода и его применимость в ситуации, когда проводятся реальные измерения, а закон изменения температуры неизвестен.

**Аналитическое решение.** Как известно [8], при заданном начальном условии

$U(x, y, 0) = \varphi(x, y)$  и выбранном краевом условии аналитическое решение (полученное методом Фурье – разделения переменных) имеет вид:

$$U_a(x, y, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{n,m} \sin(\pi n x) \sin(\pi m y) e^{-\pi^2(n^2+m^2)t},$$

где  $A_{n,m} = 4 \int_0^1 \int_0^1 \varphi(x, y) \sin(\pi n x) \sin(\pi m y) dx dy$ .

В данном исследовании в качестве  $\varphi(x, y)$  была выбрана функция  $\varphi(x, y) = A \sin(\pi n x) \sin(\pi m y)$  с некоторыми натуральными  $n, m$  и амплитудой  $A$ . Тогда аналитическое решение имеет вид  $U_a(x, y, t) = A \sin(\pi n x) \sin(\pi m y) e^{-\pi^2(n^2+m^2)t}$ .

На рис. 1 и 2 приведены изображения функции  $\varphi(x, y)$  при некоторых значениях  $n, m$  и  $A$ .

**Генерация  $f_j$ .** В большей части численных экспериментов значения  $f_j$  выбирались согласно формуле  $f_j = U_a(x_j, y_j, t_j) + \varepsilon$ , в некоторых – согласно формуле  $f_j = U_a(x_j, y_j, t_j)(1 + \varepsilon)$ , где  $x_j, y_j, t_j, \varepsilon$  являются случайными величинами, равномерно распределенными в некоторых интервалах. Точки  $x_j, y_j, t_j$  выбирались из указанной выше области,  $\varepsilon \in [-\varepsilon_l, \varepsilon_r]$ .

**Построение приближенного решения.** Для построения решения исходной задачи использовалась RBF-сеть [1], в качестве базисной функции был взят гауссиан  $c_i e^{-k_i(x-x_i)^2 - m_i(y-y_i)^2 - l_i(t-t_i)^2}$ . Таким образом, приближенное решение искалось в виде

$$U(x, y, t) = \sum_{i=1}^{n_g} c_i e^{-k_i(x-x_i)^2 - m_i(y-y_i)^2 - l_i(t-t_i)^2}. \quad (1)$$

Процесс получения результата сводился к поиску оптимальных весов сети

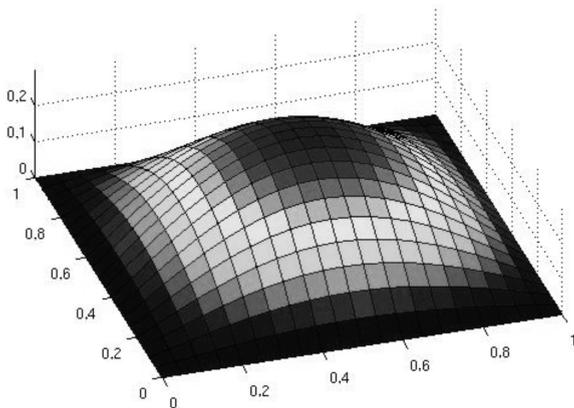


Рис. 1. График  $\varphi(x, y) = 0,3 \sin(\pi x) \sin(\pi y)$

$w_i = (c_i, k_i, m_i, l_i, x_i, y_i, t_i)$ , параметры  $k_i, m_i, l_i$  предполагаются положительными.

Подбор весов осуществлялся через минимизацию функционала ошибки, который в данной задаче имел вид  $J(U) = J(\mathbf{w}) = J_1(\mathbf{w}) + \delta_b \times J_b(\mathbf{w}) + \delta_d \cdot J_d(\mathbf{w})$ , где  $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_{n_g})$  – вектор весов сети;  $J_1(\mathbf{w}) = \sum_{j=1}^N \{U_i(\xi_j, \eta_j, \tau_j) - U_x(\xi_j, \eta_j, \tau_j) - U_y(\xi_j, \eta_j, \tau_j)\}^2$  – слагаемое, отвечающее дифференциальному уравнению (нижний индекс у функции  $U$  обозначает дифференцирование по соответствующей переменной);  $J_b(\mathbf{w}) = \sum_{j=1}^{N_b} \{U^2(0, \eta_j, \tau_j) + U^2(1, \eta_j, \tau_j) + U^2(\xi_j, 0, \tau_j) + U^2(\xi_j, 1, \tau_j)\}$  – слагаемое, отвечающее граничным условиям;  $J_d(\mathbf{w}) = \sum_{j=1}^{N_d} \{U(x_j, y_j, t_j) - f_j\}^2$  – слагаемое, отвечающее «экспериментально полученным» значениям;  $\delta_b, \delta_d > 0$  – «штрафные» множители.

Здесь в слагаемых  $J_1(\mathbf{w})$  и  $J_b(\mathbf{w})$  используются периодически регенерируемые пробные точки  $\{(\xi_j, \eta_j, \tau_j)\}_{j=1}^N$  – в области  $\Omega$ ,  $\{(0, \eta_j, \tau_j), (1, \eta_j, \tau_j), (\xi_j, 0, \tau_j), (\xi_j, 1, \tau_j)\}_{j=1}^{N_b}$  – на частях границы. Возможно задание разных законов распределения этих точек: регулярное, случайное равномерное, нормальное и др. [1–3].

На самом деле рассматривается попеременная минимизация одного функционала из набора

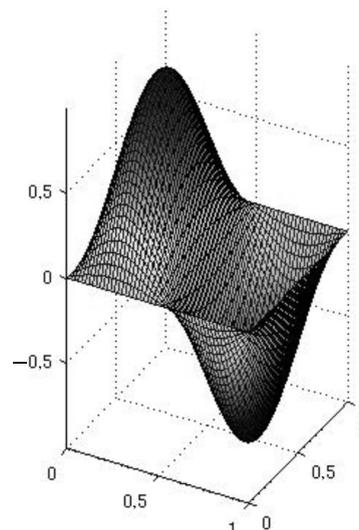


Рис. 2. График  $\varphi(x, y) = \sin(\pi x) \sin(2\pi y)$

$J(\mathbf{w})$  для фиксированного выбора пробных точек, при этом каждый такой функционал минимизируется не до конца, а производится несколько шагов минимизации, после чего функционал меняется в соответствии с заменой (перегенерацией) пробных точек. Необходимо подчеркнуть, что ищется не минимум функционала  $J(\mathbf{w})$ , а точка  $U_\eta$  на многообразии нейросетевых функций данной архитектуры –  $\eta$ -решение [1] задачи (1):  $J(U_\eta) < \eta$ , при этом число  $\eta > 0$  достаточно мало для того, чтобы считать построенную модель достаточно точной.

Выбор структуры сети является отдельной проблемой. В данном исследовании используются сети фиксированного размера и растущие сети. (см. также [5].)

**Сети постоянного размера.** Решение искалось в виде (1), причем значение  $n_e$  было фиксировано. Метод локальной оптимизации – метод сопряженных градиентов (Флетчера–Ривса), метод выбора шага – плавающий шаг, наконец, метод глобальной оптимизации – метод рестартов.

Поясним некоторые моменты. Задача поиска минимума подразделяется на две: реализацию поиска локального минимума и реализацию поиска глобального минимума.

Большая часть градиентных методов поиска локального минимума имеет следующий вид.

1. Выбираем начальное значение  $\mathbf{w}_0$ .

2. Сдвигаемся по формуле  $\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_{k-1} + \eta_k \mathbf{p}_k$ , где  $\eta_k$  и  $\mathbf{p}_k$  — шаг и направление движения соответственно. При этом  $\mathbf{p}_k = \mathbf{g}_k + \beta_k \mathbf{p}_{k-1}$ , где  $\mathbf{g}_k$  – вектор антиградиента функционала ошибки.  $\beta_k$  в нашем случае вычислялось по формуле (метод Флетчера–Ривса):  $\beta_k = \frac{(\mathbf{g}_k, \mathbf{g}_k)}{(\mathbf{g}_{k-1}, \mathbf{g}_{k-1})}$ .

3. Пункт 2 повторяем необходимое число раз.

*Метод плавающего шага* состоит в следующем.

1. Параметры алгоритма  $\gamma_1 : \gamma_1 > 1$ ;  $\gamma_2 : 0 < \gamma_2 < 1$  и начальный шаг задаются в начале работы всего алгоритма. Обычно выбирают  $\gamma_1 = 2$ ;  $\gamma_2 = 0,5$ .

2. После того, как найдено очередное направление движения, в качестве начального приближения берется шаг с предыдущей итерации.

3. На очередном шаге вычисляем значение функционала ошибки  $J(\mathbf{w}_k + \eta_{k-1} \mathbf{p}_k)$ .

4. Если это значение меньше предыдущего  $J(\mathbf{w}_k)$ , то шаг умножаем на  $\gamma_1$  и снова вычисляем значение ошибки. Если функционал ошиб-

ки продолжает убывать, то шаг снова умножаем на число  $\gamma_1$  и т. д., пока ошибка не начнет возрастать. Тогда предпоследнюю точку (минимум) фиксируем, вычисляем новое направление и повторяем процедуру сначала.

5. Если  $J(\mathbf{w}_k + \eta_{k-1} \mathbf{p}_k)$  больше  $J(\mathbf{w}_k)$ , то шаг умножаем на число  $\gamma_2$  и продолжаем уменьшение шага, пока ошибка не станет меньше  $J(\mathbf{w}_k)$ . Получившийся шаг фиксируем и вычисляем новое направление.

*Метод рестартов* (глобальная оптимизация) состоит в следующем.

1. Выбираем начальное значение  $\mathbf{w}_0$  из некоторой заданной заранее области.

2. Применяем метод локальной оптимизации. Запоминаем результат.

3. Повторяем пункты 1, 2 до выполнения условий выхода (которые определяются пользователем).

Еще раз отметим, что набор тестовых точек ( $\xi_j, \eta_j, \tau_j$  и т. п. в слагаемых  $J_1, J_b$ ) не был фиксированным, а через определенное число шагов менялся. Ясно, что это позволило не выбирать параметры  $N, N_b$  слишком большими (что привело бы к чрезмерной трудоемкости вычислений) и при этом не опасаться, что решение будет хорошо лишь в некоторых точках, а между ними будет «вести себя» плохо.

Алгоритм был реализован на языке C++. Произведено большое число вычислений для различных параметров. Большой объем численных экспериментов необходим для того, чтобы подобрать оптимальные значения некоторых параметров, таких, как штрафные множители, число нейронов  $n_e$ , число пробных точек  $N$  и  $N_b$ , область  $W$ , из которой случайно выбирается вектор весов  $\mathbf{w}_0$ .

Отметим, что самым важным из перечисленных параметров является область  $W$ , правильный ее выбор приводит к значительному ускорению работы алгоритма, а неправильный приводит алгоритм в нерабочее состояние. Приходилось либо опираться на здравый смысл, выбирая центры гауссианов  $x_i, y_i, t_i$  из области, подобной  $\Omega$ , но в несколько раз большей, показатели в гауссиане – исходя из правила трех сигм, а коэффициенты  $c_i$  – исходя из масштаба экспериментальных данных, либо основываться на результатах уже произведенных вычислений.

Следующими по значимости представляются штрафные множители. Они должны обеспечить равновесие между тремя слагаемыми, входящи-

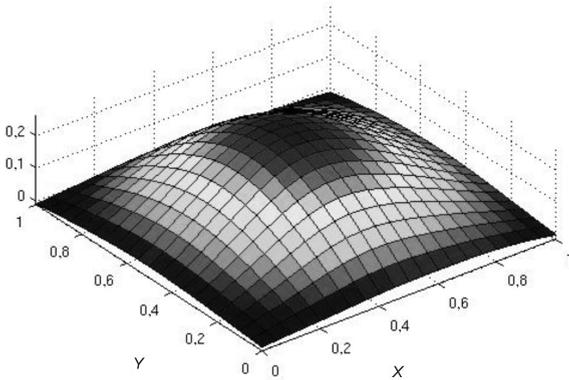


Рис. 3. Восстановленное начальное условие  $\varphi(x, y)$

ми в функционал ошибки. Опять же, приходилось основываться на результатах численных экспериментов, которые показали, что среднеквадратичная ошибка, соответствующая слагаемому  $J_1$  (и вычисляемая по формуле  $\sigma_1 = \frac{1}{N} \sqrt{J_1}$  на некотором наборе пробных точек) обычно на порядок больше каждой из среднеквадратичных ошибок для двух других слагаемых (и вычисляемых по аналогичным формулам). Отсюда вытекают формулы для штрафных множителей:  $\delta_b = 100 \frac{N}{4N_b}$ ,  $\delta_d = 100 \frac{N}{N_d}$  (в знаменателе первой из формул стоит  $4N_b$ , так как  $N_b$  – число пробных точек лишь на одной стороне квадратной области изменения координат  $x, y$ ).

А вот число нейронов  $n_e$  и числа  $N$  и  $N_b$  несколько менее значимы. Конечно, хочется сделать их как можно больше, но это приводит к нежелательной трудоемкости вычислений. Впрочем, опыт показал, что уже при  $n_e \approx 100$ ,  $N \approx 300$ ,

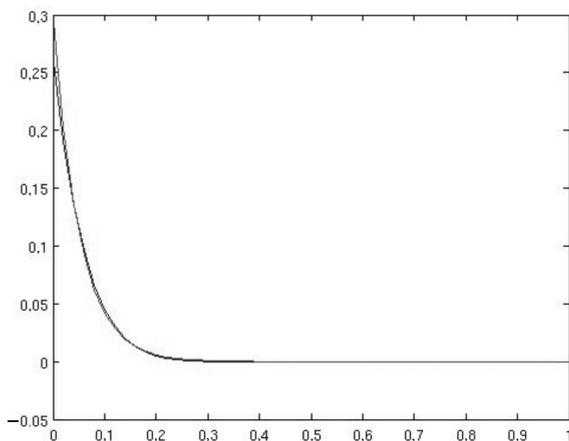


Рис. 4. Сечение  $x = y = 0,5$ ; зависимость от времени  $U(0,5; 0,5; t)$

$N_b \approx 50$  результат вполне удовлетворителен.

Приведем один из полученных результатов.

Значения параметров  $n_e = 20$ ;  $N = 100$ ;  $N_b = 20$ ;  $N_d = 100$ ;  $A = 0,3$ ;  $n = m = 1$ ;  $\varepsilon_l = \varepsilon_r = 0,0001$ ;  $T = 1$ . Результаты вычислений проиллюстрированы графиками. На рис. 3 – восстановленные начальные данные  $\varphi$ . Налицо схожесть с рис. 1. На рис. 4 и 5 приведены для сравнения одновременно сечения полученного решения и аналитического.

Отметим существенный недостаток этого подхода: случайно выбираются сразу все веса сети, и только потом применяется алгоритм минимизации ошибки. Это означает, что если нам повезло, и мы попали в окрестность искомого минимума, то решение будет построено, иначе – может и не найтись. Однако вероятность попасть в нужную яму слишком мала – мы случайно выбираем точку в  $7n_e = 203$ -мерном пространстве. Для того чтобы все же попасть в «хорошую» яму, необходимо произвести достаточно большое количество рестартов, что приводит к значительным временным затратам.

**Растущие сети.** Намного эффективнее показал себя так называемый *метод растущих сетей*. Основная идея состоит в том, что нейроны (в данном случае снова гауссианы) добавляются последовательно, поэтому на каждом шаге производится минимизация функционала, зависящего от меньшего числа переменных, а нейроны, добавленные ранее, остаются при этом «замороженными». Конечно, при этом намного больше вероятность попасть в глобальный минимум. Данный метод позволяет выстроить путь к  $U_\eta$  [5].

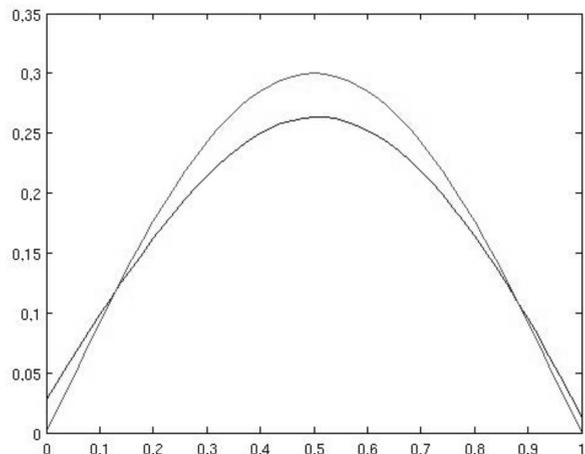


Рис. 5. Сечение  $x = 0,5$ ;  $t = 0$ ; зависимость  $U(0,5; y; 0)$

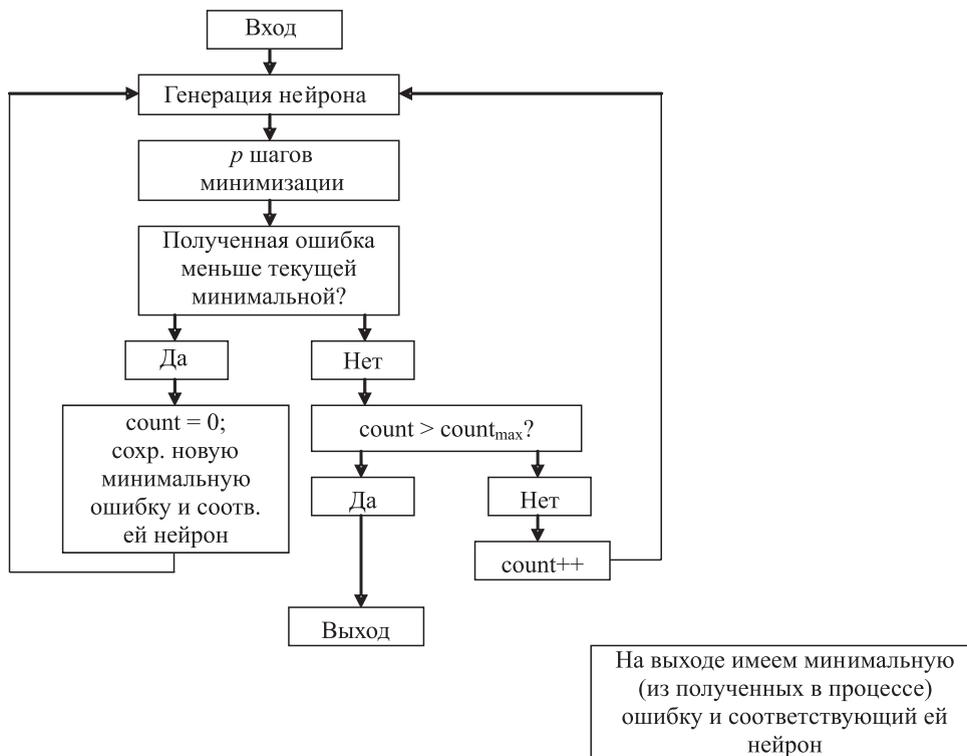


Рис. 6. Блок-схема добавления нейрона

Здесь возможны разные варианты: можно добавлять нейроны по очереди; можно добавлять не по одному, а сразу несколько; можно после добавления очередного нейрона обучать всю сеть целиком.

В процессе данного исследования была реализована растущая сеть с добавлением нейронов по одному с обучением всей сети после очередного добавления. Добавление же нейрона происходит в точности по тому алгоритму, что описан в разделе «Сети постоянного размера». Приведем для большей наглядности блок-схему алгоритма добавления нейрона (рис. 6).

Из блок-схемы видно, что алгоритм закончит свою работу только тогда, когда заданное число раз ( $count_{max}$ ) не будет получена ошибка меньше, чем текущая минимальная.

На блок-схеме не отмечен важный момент: в процессе выполнения шагов минимизации (конкретнее – после каждого шага) производится проверка, не является ли обучаемый нейрон «плохим». Под «плохим» нейроном понимается тот, чей вклад в минимизацию ошибки меньше наперед заданного малого числа или увеличивает ошибку на тестовой выборке (т. е. вычисленного

с помощью регенерированных тестовых точек). Однако, из опыта, «плохость» нейрона проявляется лишь спустя некоторое число шагов минимизации, что связано с характером зависимости ошибки от весов нейрона. Численные эксперименты данного исследования позволяют сделать предположение о виде этой зависимости (рис. 7).

На рисунке схематично изображено сечение зависимости ошибки от одного из весов (от веса  $k_i$ ). Штриховкой обозначена область значений, в которой антиградиент ошибки указывает в сторону, где нейрон становится тривиальным (а ошиб-

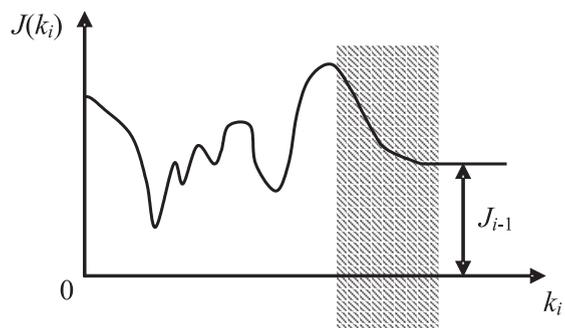


Рис. 7. Качественная зависимость функционала ошибки от одного из весов

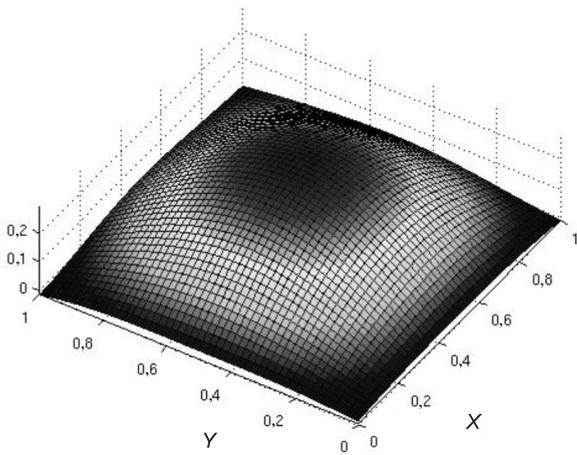


Рис. 8. Восстановленное начальное условие  $\varphi(x, y)$

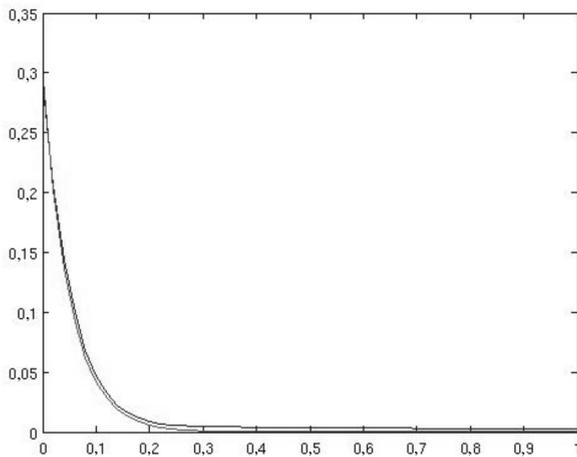


Рис. 9. Сечение  $x = y = 0,5$ ; зависимость от времени  $U(0,5; 0,5; t)$

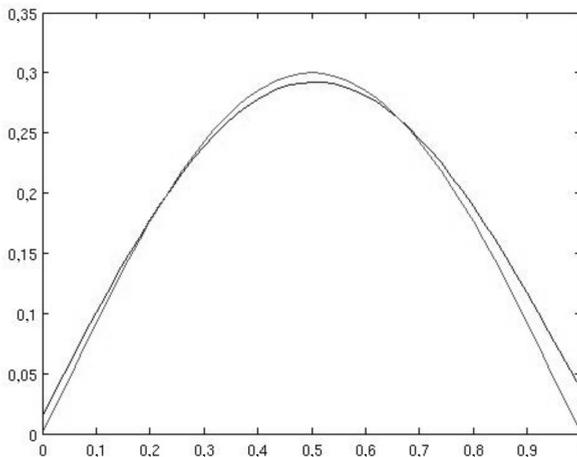


Рис. 10. Сечение  $x = 0,5; t = 0$ ; зависимость  $U(0,5; y; 0)$

ка при этом стремится к значению, вычисленному на сети без этого нейрона и обозначенному на рисунке  $J_{i-1}$ ). Стартував из этой области, алгоритм минимизации через некоторое число шагов обнулит нейрон, о чем и говорилось выше. Опыт показал, что в указанную область случайно выбираемый вектор весов попадает довольно часто, и поэтому для ускорения работы алгоритма такие нейроны необходимо отбраковывать.

Для этого метода тоже справедливы все рассуждения насчет подбора параметров алгоритма и степени их важности, приведенные выше. Для расчета штрафных множителей используются те же формулы.

Приведем некоторые результаты.

1. Значения параметров алгоритма  $n_e = 50$ ;  $N = 350$ ;  $N_b = 40$ ;  $N_d = 100$ ;  $A = 0,3$ ;  $n = m = 1$ ;  $\varepsilon_l = 0$ ;  $\varepsilon_r = 0,01$ ;  $T = 1$ ;  $J1 = 1,3$ ;  $J2 = 0,7$ ;  $\text{count}_{\max} = 50$ . Графики приведены на рис. 8–10.

Обратим внимание, что при несимметричной и довольно большой погрешности ( $\varepsilon_l = 0$ ,  $\varepsilon_r = 0,01$ ) график решения, как и ожидалось, поднялся, причем на величину порядка  $\varepsilon_r$ , что хорошо видно из рис. 9.

2. Значения параметров те же, за исключением погрешности  $\varepsilon_l = \varepsilon_r = 0,001$ . Графики приведены на рис. 11–13.

Обратим внимание на необычность результата: решение, полученное из данных с большей погрешностью (п. 1), оказалось лучше решения, где погрешность была меньше. Это странное явление можно связать с качеством «экспериментальных» данных. Как видно, например, из рис. 12, уже

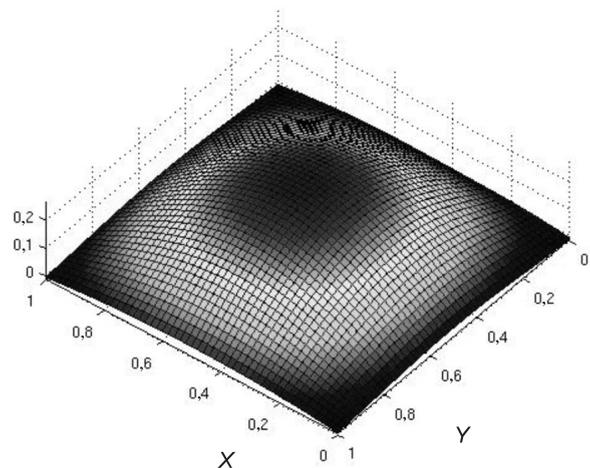


Рис. 11. Восстановленное начальное условие  $\varphi(x, y)$

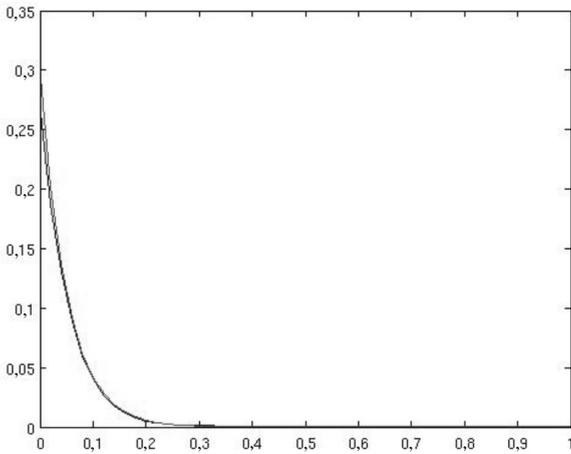


Рис. 12. Сечение  $x = y = 0,5$ ; зависимость от времени  $U(0,5; 0,5; t)$

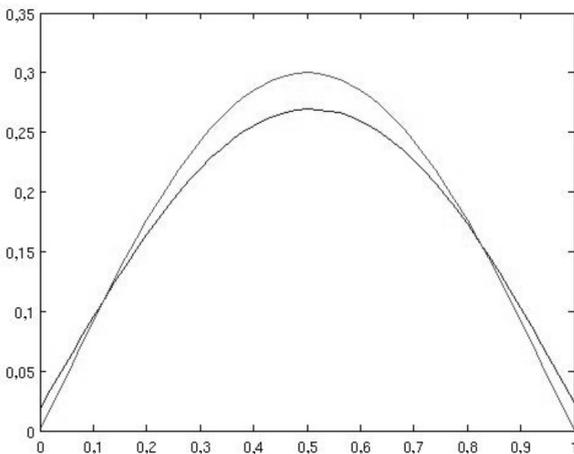


Рис. 13. Сечение  $x = 0,5$ ;  $t = 0$ ; зависимость  $U(0,5; y; 0)$

при  $t > 0,3$  решение близко к нулю. При этом результат строится при  $0 < t < 1$ . Если значительная часть данных попадет в область  $t > 0,3$  (а данные генерировались случайно и равномерно в промежутке  $0 < t < 1$ ), то решение будет восстанавливаться плохо, что, надо полагать, и произошло в данном случае. То есть можно говорить, что алгоритм получает на вход «некачественные» данные, если значительная часть значений  $f_j$  слишком близка к нулю.

Конечно, интересен вопрос, как зависит приближенное решение от числа  $N_d$ , т. е. от количества точечных измерений. В данном исследовании также были построены решения при  $N_d = 50$ ; (что в два раза меньше, чем в п. 1 и 2) с использованием описанных выше алгоритмов. Как ни

странно, результаты не отличаются от уже приведенных.

3. Наиболее интересно восстановление старших мод. Использование описанного в данном разделе метода дало следующие результаты. Значения параметров  $n_e = 200$ ;  $N = 350$ ;  $N_b = 40$ ;  $N_d = 100$ ;  $A = 0,3$ ;  $n = 1$ ;  $m = 2$ ;  $\varepsilon_l = \varepsilon_r = 0,001$ ;  $T = 0,2$ ;  $J_1 = 1,3$ ;  $J_2 = 0,7$ ;  $\text{count}_{\max} = 50$ . Обратим внимание, что  $T = 0,2$  по указанной в п. 2 причине. Графики приведены на рис. 14 и 15.

Из графиков видно, что характер решения прослеживается, и, казалось бы естественным, что если учить и учить сеть данным алгоритмом,

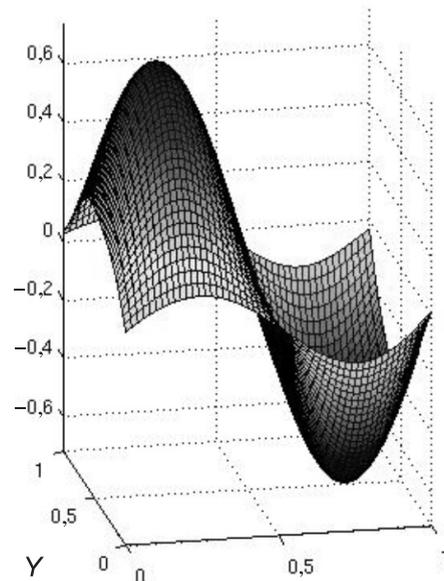


Рис. 14. Восстановленное начальное условие  $\varphi(x, y)$

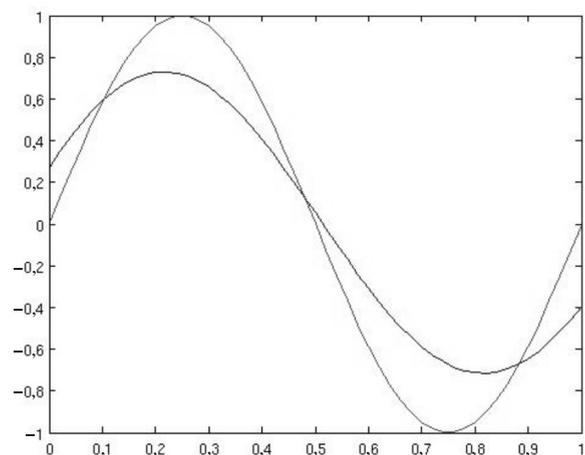


Рис. 15. Сечение  $x = 0,5$ ;  $t = 0$ ; зависимость  $U(0,5; y; 0)$

то решение будет приближаться и приближаться к истинному. Однако на практике это оказалось не так – решение лучше не становилось даже после длительного обучения сети. Стало понятно, что алгоритм необходимо модифицировать.

4. Такой модификацией явилось решение линейной системы относительно весов  $c_i$ . Из формулы (1) следует, что можно составить такую систему линейных уравнений

$$\frac{\partial J}{\partial c_i} = 0, \quad i = 1, \dots, n_e \quad (2)$$

для нахождения коэффициентов  $c_i$  (т. к. в функционал они входят квадратично).

Таким образом, решаем систему

$$Ac = B. \quad (3)$$

Приведем формулы для матрицы этой системы и ее правой части:

$$A_{ik} = \sum_{j=1}^N \alpha_i(\xi_j, \eta_j, \tau_j) \alpha_k(\xi_j, \eta_j, \tau_j) + \delta_b \sum_{j=1}^{N_b} \left\{ \begin{array}{l} \psi_i(0, \eta_j, \tau_j) \psi_k(0, \eta_j, \tau_j) + \\ \psi_i(1, \eta_j, \tau_j) \psi_k(1, \eta_j, \tau_j) + \\ \psi_i(\xi_j, 0, \tau_j) \psi_k(\xi_j, 0, \tau_j) + \\ \psi_i(\xi_j, 1, \tau_j) \psi_k(\xi_j, 1, \tau_j) \end{array} \right\} + \delta_d \sum_{j=0}^{N_d} \psi_i(x_j, y_j, t_j) \psi_k(x_j, y_j, t_j),$$

$$B_i = \delta_d \sum_{j=0}^{N_d} f_i \psi_i(x_j, y_j, t_j),$$

где

$$\psi_i(x_j, y_j, t_j) = e^{-k_i(x-x_i)^2 - m_i(y-y_i)^2 - l_i(t-t_i)^2}$$

$$\alpha_i(\xi_j, \eta_j, \tau_j) = -\psi_i(\xi_j, \eta_j, \tau_j) \left\{ 2l_i(\tau_j - t_i) + k_i(4k_i(\xi_j - x_i)^2 - 2) + m_i(4m_i(\eta_j - y_i)^2 - 2) \right\}.$$

В указанных формулах индексы  $i$  и  $k$  нумеруют нейроны, а индекс  $j$  – пробные или «экспериментальные» точки. Таким образом,  $x_i$  – вес нейрона, а  $\xi_j$  или  $x_j$  – координата.

Алгоритм был изменен следующим образом. После добавления и обучения нескольких первых нейронов (например, первых семи) решалась система (3). Это позволило получить значительно лучший результат для моды  $n = 1, m = 2$ . Параметры алгоритма те же, что и в предыдущем пункте, за исключением  $n_e = 50$ . Графики приведены на рис. 16 и 17.

Особо обратим внимание на то, что число ней-

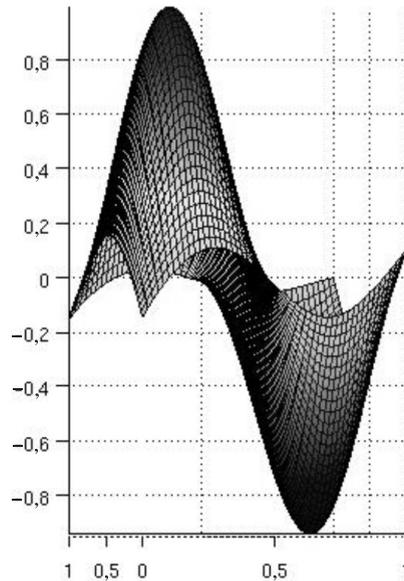


Рис. 16. Восстановленное начальное условие  $\varphi(x, y)$

ронов равно всего лишь пятидесяти против двухсот в предыдущем пункте, а решение не только не хуже, но даже значительно лучше, что легко заметить из графиков.

Тем не менее, из п. 3 и 4 видно, что мода  $n = 1, m = 2$  восстанавливается не так хорошо, как мода  $n = m = 1$ . Резонно предположить, что последующие моды еще хуже поддаются восстановлению. Попробуем указать пути решения этой проблемы. Во-первых, из симметрии решения (см., например, рис. 2) можно предположить, что нейроны эффективнее добавлять по два, а не по одному. Развивая эту мысль даль-

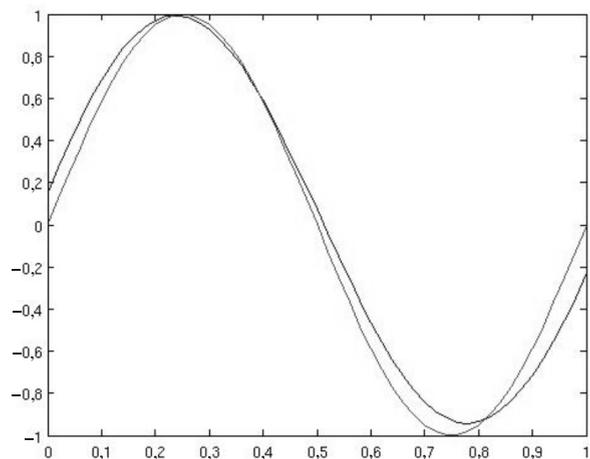


Рис. 17. Сечение  $x = 0,5; t = 0$ ; зависимость  $U(0,5; y; 0)$

ше, можно менять число добавляемых нейронов от шага к шагу. Во-вторых, крайне необходимо произвести распараллеливание вычислений, что уменьшит временные затраты на метод рестартов в алгоритме добавления нейрона. В-третьих, необходимо более конкретно разобраться, как именно следует выбирать веса сети, как генерировать пробные точки. В данной работе и те и другие генерировались равномерно, что является самым простым вариантом, однако следует рассмотреть и другие распределения: нормальное, Коши и пр.

**Перспективы.** Укажем также некоторые перспективы рассматриваемой задачи. Наиболее привлекательным и нужным усложнением является введение неточно заданных коэффициентов. К примеру, рассмотрим ту же задачу, что описана в этой статье, только несколько изменим уравнение

$$\frac{\partial U}{\partial t} = r \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right),$$

причем будем считать коэффициент  $r$  заданным не точно, а лежащим в некотором интервале  $r \in (r_{\min}; r_{\max})$ . Тогда, имея экспериментальные данные, тем не менее, можно восстановить функцию  $U$ . Самый простой способ это сделать – включить  $r$  в число подбираемых параметров наряду с весами нейронной сети. Более сложный, но и более эффективный метод можно предложить для случая известного начального условия: он состоит в поиске параметризованного решения задачи в виде

$$U(x, y, t, r) = \sum_{i=1}^{n_s} c_i e^{-k_i(x-x_i)^2 - m_i(y-y_i)^2 - l_i(t-t_i)^2} e^{-p_i(r-s_i)^2},$$

$$r \in (r_{\min}; r_{\max})$$

с дальнейшим выбором  $r$  исходя из экспериментальных данных. Опыт показывает, что при

построении подобных нейросетевых разложений целесообразно использовать гетерогенные ИНС.

В публикации [6] данный вопрос был подробно рассмотрен в одномерном случае для задачи тепломассопереноса в грануле пористого катализатора. На основе нейросетевого подхода был успешно получен результат.

Несомненный интерес представляет исследование других методов оптимизации, применение иных нейросетевых функциональных базисов, использование эволюционных алгоритмов при одновременной настройке весов сети и подборе ее структуры.

Еще одним вариантом развития задачи является рассмотрение неоднородного уравнения, других граничных условий, случая кусочных коэффициентов, учет нелинейностей. Важным представляется исследование многомерных задач со сложной геометрией (заметим, что переход от одномерной задачи к двумерной не привел к «проблеме размерности»).

При решении серии задач с уточняемой постановкой (пополняемые данные) наряду с построением приближенного решения задачи могут быть определены коэффициенты, входящие в ее постановку. Нейросетевой подход успешно работает и в задачах, связанных с оптимизацией формы области, где ищется решение, а также в задачах с многокомпонентными системами с искомой границей раздела сред [1].

Предложенная методика, существенно использующая достоинства нейросетевых разложений [1], применима и в случае неклассических постановок, в частности, при построении регуляризаций решений некорректных задач, что и было продемонстрировано в данной статье.

Работа выполнена при поддержке РФФИ – грант 09-08-00934-а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев, А.Н.** Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения [Текст]/ А.Н. Васильев, Д.А. Тархов.–СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009.–528 с.
2. **Васильев, А.Н.** Нейросетевое моделирование в математической физике [Текст]/ А.Н. Васильев//«Нейрокомпьютеры»: разработка, применение.–М.: Радиотехника, 2009.–№5.–С. 25–38.
3. **Васильев, А.Н.** Нейросетевая методология построения приближенных математических моде-

- лей распределенных систем [Текст]/ А.Н. Васильев, Д.А. Тархов//Труды науч.-метод. семинара кафедры высшей математики.–СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.–Вып.1.–С. 115–170.
4. **Васильев, А.Н.** Нейросетевые подходы к регуляризации решения задачи продолжения температурных полей по данным точечных измерений [Текст]/ А.Н. Васильев, Д.А. Тархов//«Нейрокомпьютеры»: разработка, применение.–М.: Радиотехника, 2010.–№7.–С.13–19.

5. **Васильев, А.Н.** Унифицированный процесс моделирования физико-технических объектов с распределенными параметрами [Текст]/А.Н. Васильев, В.П. Осипов, Д.А. Тархов//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Физ.-мат. науки.–2010.–№3 (104).–С. 39–52.

6. **Васильев, А.Н.** Нейросетевое решение задачи о пористом катализаторе [Текст]/А.Н. Васильев, Д.А. Тархов//Научно-технические ведомости

СПбГПУ. Сер. Физ.-мат. науки.–2008.–№6 (67). –С. 110–113.

7. **Самарский, А.А.** Численные методы решения обратных задач математической физики [Текст]/А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич.–М.: Едиториал УРСС, 2004.–480 с.

8. **Тихонов, А.Н.** Уравнения математической физики [Текст]/А.Н. Тихонов, А.А. Самарский.–М.: Наука, 1977.–735 с.

УДК 519.711.3

*В.И. Антонов, А.И. Загайнов, А.Н. Коваленко, Ву ван Куанг*

## **АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ЭНТРОПИЙНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА КАРДИОРИТМА**

К настоящему времени наиболее совершенствующимся методом неинвазивной оценки общесистемного состояния организма является метод физиологической интерпретации вариабельности сердечного ритма (ВСР). Он основан на распознавании и измерении временных интервалов между последовательными нормальными QRS-комплексами электрокардиограммы. В 1996 г. Европейским обществом кардиологии и Северо-Американским электрофизиологическим обществом в качестве стандартов измерений даны рекомендации по клиническому использованию этого метода [4]. В соответствии с решением Комиссии по клинико-диагностическим приборам и аппаратам Комитета по новой медицинской технике Министерства Здравоохранения РФ выделены четыре направления анализа ВСР, рекомендованных при разработке новых электрокардиографических систем [3].

Как известно [5], ВСР содержит в себе оценку состояния механизмов регуляции физиологических флуктуаций, в частности, общей активности регуляторных механизмов, нейрогуморальной регуляции, соотношениями между симпатическим и парасимпатическим отделами вегетативной нервной системы. Адаптационная реакция целостного организма отражена в оптимальном для него приспособительном ответе многоконтурной, многоуровневой системы регуляции кровообращения, изменяющей во времени свои параметры. Функциональная организация адаптационных реакций строго индивидуальна и реализована с различной степенью участия обратных связей отдельных функциональных систем. Для ее характеристики большинством исследователей [5] используются известные линейные модели (статистические,

спектральные, корреляционные методы). Однако столь сложная организация адаптационной реакции не поддается линейному описанию, поскольку характеризующие ее переходные процессы имеют тенденцию к развитию во времени [8]. Поэтому происходит постепенный переход к исследованию временных рядов ВСР нелинейными математическими моделями. При этом абсолютным лидером по построению нелинейных характеристик ВСР является метод фрактального анализа (метод теории детерминированного хаоса).

### **Метод теории детерминированного хаоса**

Метод теории детерминированного хаоса состоит в переходе от самого сигнала к восстановленному в  $n$ -мерном фазовом пространстве псевдоаттрактору. Наиболее известные методы восстановления псевдоаттрактора – метод последовательного дифференцирования и метод задержки Такенса:

$$\vec{x}(t) = (a(t), \frac{da(t)}{dt}, \dots, \frac{d^{n-1}a(t)}{dt^{n-1}});$$

$$\vec{x}(t) = (a(t), a(t + \tau\Delta t), \dots, a(t + \tau(n-1)\Delta t)),$$

где  $a(t)$  – исходный временной ряд. Заметим, что используемые нами реализации были сняты со слишком большим шагом дискретизации, поэтому аппроксимация производных правой конечной разностью  $\frac{da}{dt} = \frac{a(t + \Delta t) - a(t)}{\Delta t}$  не является приемлемой. Поэтому здесь удобнее использовать метод задержки, являющийся технически более простым. Однако при таком выборе возникает проблема поиска параметра задержки, его изменения в режиме реального времени. В ряде работ [2, 9] предложено выбирать в качестве па-

параметра задержки первый нуль автокорреляционной функции

$$B(\tau) = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} (a_k - \bar{a})(a_{k+\tau} - \bar{a}), m = M - \tau$$

первый локальный минимум функции средней взаимной информации

$$I(\tau) = - \sum_{a_k} P(a_k, a_{k+\tau}) \ln \left( \frac{P(a_k, a_{k+\tau})}{P(a_k)P(a_{k+\tau})} \right),$$

где  $a_k$  – событие « $a(t)$  принадлежит  $k$ -му интервалу», или первый локальный минимум обобщенного корреляционного интеграла

$$C(r) = \sum_{i=0}^{m-2} \sum_{j=i+1}^{m-1} \frac{\theta(\varepsilon - \rho(a_i, a_j))}{m(m-1)/2}, \theta(\alpha) = \begin{cases} 1, \alpha \geq 0 \\ 0, \alpha < 0 \end{cases},$$

где  $\rho$  – метрика фазового пространства.

Существуют специальные способы задания выбора параметра задержки [9]. Однако на практике второй способ является наиболее приемлемым и инвариантным относительно вида обрабатываемого сигнала.

Для количественной оценки характеристик псевдоаттрактора обычно используются вероятностные (фрактальные) размерности, наиболее известный представитель которых – корреляционная размерность:

$$D_C = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \left( \sum_{i=1}^{M(\varepsilon)} p_i^2 \right)}{\ln(\varepsilon)}.$$

Прежде всего, она характеризует возможность описания временного ряда в конечномерном пространстве. Для самых простых временных рядов (например, постоянных) она равна нулю, для абсолютно случайных процессов  $D_C \rightarrow \infty$ . Этот факт демонстрируется отсутствием насыщения кривой зависимости корреляционной размерности от размерности пространства вложения.

Для ее вычисления строится корреляционный интеграл:

$$C(r) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m^2} \sum_{i,j=1}^m \theta(r - \rho(x_i, x_j)),$$

где  $\theta(\alpha) = \begin{cases} 1, \alpha \geq 0 \\ 0, \alpha < 0 \end{cases}$  – функция Хевисайда;  $\rho$  – расстояние в  $n$ -мерном фазовом пространстве по его конечной оценке:

$$C(r) = \sum_{i=0}^{m-2} \sum_{j=i+1}^{m-1} \frac{\theta(r - \rho(x_i, x_j))}{m(m-1)/2}.$$

На приемлемом диапазоне значений  $r$  (так называемом *скейлинговом диапазоне*) корреляционный интеграл приближается к аппроксимирующей его прямой, тангенс угла наклона кото-

рой дает оценку корреляционной размерности. Рекомендации нахождения его грани различны. На практике скейлинговый диапазон очень часто считают постоянным. В данной статье предложен способ нахождения скейлингового диапазона с учетом плотности вероятности нахождения точек на псевдоаттракторе. При этом строится плотность вероятности, находится ее глобальный максимум и относительно этого значения на заданном уровне горизонтальной прямой находятся значения корней пересечения плотности вероятности и прямой.

Аппроксимационная (корреляционная) энтропия отражает вероятность возникновения новых режимов при возрастании размерности пространства вложения. Чем она больше, тем больше неопределенностей в исходном сигнале. Для ее вычисления генерируется два псевдоаттрактора в последовательных пространствах вложения. Обычно  $n+1$ -мерное пространство является следующим по отношению к условиям теоремы Такенса. Для оценки их схожести вычисляют корреляционный интеграл в каждом пространстве. При этом аппроксимационная энтропия находится следующим образом:

$$ApEn(n, r) = - \ln \left( \frac{C^{n+1}(r)}{C^n(r)} \right).$$

Рекомендации по нахождению конкретного расстояния  $r$  для нахождения значения аппроксимационной энтропии в литературе обычно опущены. Приемлемым значением расстояния  $r$  в настоящей статье мы считаем то расстояние, на котором корреляционный интеграл пересекается с прямой его аппроксимирующей в двойном логарифмическом масштабе в  $(n+1)$ -мерном фазовом пространстве (тангенс угла этой прямой является оценкой корреляционной размерности). В случае, если  $r$  выходит за границы скейлингового диапазона в  $n$ -мерном пространстве, то оно вычисляется в  $n$ -мерном фазовом пространстве тем же самым алгоритмом. На практике проверки этих двух условий достаточно для нахождения  $r$ . Теоретически, если оба условия не выполнены, в качестве значения  $r$  можно взять одну из границ скейлингового диапазона (в зависимости от нахождения пересечения корреляционного интеграла с аппроксимирующей его прямой) в  $(n+1)$ -мерном фазовом пространстве.

Старший показатель Ляпунова является количественной мерой расхождения траекто-

рий псевдоаттрактора в фазовом пространстве и характеристикой его устойчивости. В 1985 г. А. Wolf предложил оценивать старший показатель, непосредственно используя аттрактор и не переходя к характеризующему его нелинейному отображению. Поэтому этот алгоритм может быть использован и в том случае, когда такое отображение не существует. Суть его состоит в расчете отношения:

$$\lambda \cong \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \ln\left(\frac{l'_i}{l_i}\right)}{\sum_{i=1}^M t_i},$$

где  $l_i = \|x'_i - x_i\|$  – расстояние между наиболее близкими точками псевдоаттрактора, располагающихся на траекториях, имеющих, по возможности, одинаковое направление;  $l'_i = \|y'_i - y_i\|$  – заключительное значение расстояния эволюционирующих точек аттрактора, не превышающее заданного значения  $\varepsilon$ .

К сожалению, в большинстве работ по оценке и физиологической интерпретации ВСП, использующих метод фрактального анализа, оценка фрактальных показателей варибельности происходит в готовых статических программных реализациях, не учитывающих структуру самой ВСП и ее изменение в реальном времени. В статье рассмотрены эти программные реализации и установлено, что некоторые из них не имеют графического пользовательского интерфейса (RQA, TISEAN), другие вычисляют неполный спектр необходимых характеристик (FracLab, RQA, Фрактан 4.4, CorDimension), либо не автоматизированы для вычислений (TISEAN).

При этом, для исследования «длинных» записей ВСП необходимо динамическое обновление массива данных. Это связано, прежде всего, с тем, что указанные сигналы очень часто не являются детерминированными и не существуют конечномерного пространства вложения для псевдоаттракторов, восстановленных по столь большим массивам накопленных значений. Кроме того, существуют конечные общепринятые оценки длины временного ряда, необходимые для вычисления его фрактальных характеристик. Отметим, что ни один из рассмотренных программных инструментов не учитывает динамику изменения фрактальных показателей в режиме реального времени. Все это в комплексе указывает на необходимость разработки новой программной составляющей, вычисляющей ряд наиболее известных фрактальных показателей ВСП, учитывающей структуру самой ВСП и дающей возможность обработки временного ряда в режиме реального времени.

### Разработанное программное обеспечение

Мы создали автоматизированный комплекс, работающий в динамическом режиме. Это связано, с одной стороны, с устойчивой тенденцией к изучению изменения фрактальных компонент ВСП в 24-часовой период снятия ЭКГ, а, с другой, в связи с выявлением изменений рассматриваемых в работе характеристических показателей и их трендов, в зависимости от параметров вычислительной процедуры – размерности пространства вложения, времени задержки, скейлингового диапазона и др. Выбор динамического режима связан с прогностической составляющей



Рис. 1. Структура аппаратно-программного комплекса

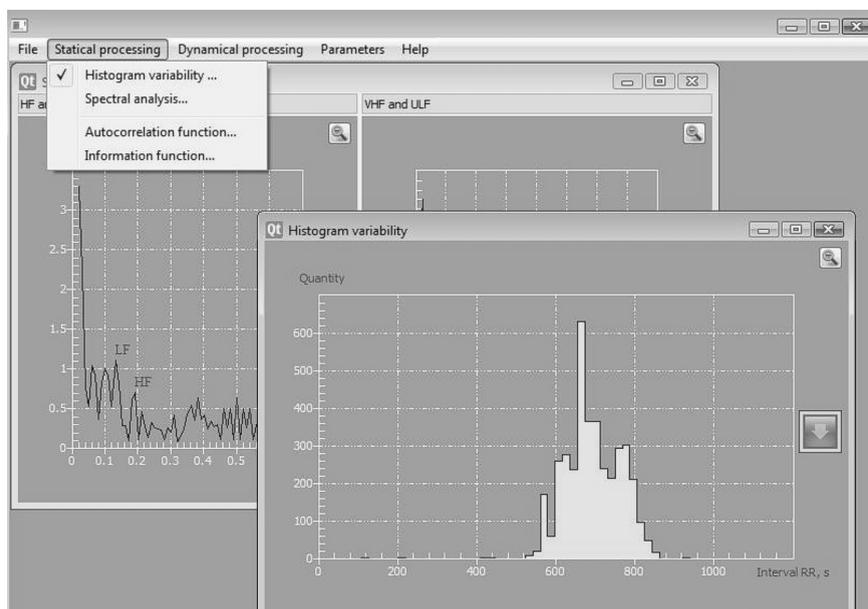


Рис. 2. Пример построения гистограммы и вычисления спектральных компонент variability

изменений характеристических показателей. Кроме того, на наш взгляд, оперативное отслеживание массива данных в режиме реального времени предпочтительнее дискретного вычисления характеристического показателя по различным частям массива, как это сделано в большинстве работ.

При этом, в разработанном нами программном обеспечении присутствует не только динамическая, но и статическая составляющая. Это обусловлено выбором статических параметров нелинейной обработки сигнала. Кроме того, с целью его использования в клинической практике, комплекс содержит некоторые линейные показатели ВСП, отсутствующие во многих системах холтеровского мониторинга ЭКГ. Структура разработанного приложения приведена на рис. 1. Программная составляющая комплекса выполнена на платформе объектно-ориентированной библиотеки Qt v.4.5.2 (2009) с использованием графики OpenGL.

В силу большого количества программных реализаций систем обработки холтеровских мониторов мы решили не включать в наш программный инструмент давно известные и зарекомендовавшие себя в клинической практике показатели, кроме спектральных характеристик (значений мощностей в различных частотных диапазонах, низко- и высокочастотных спектральных компонент, их отношений), гистограмм variability

ности. Пример вычисления спектральных компонент ВСП и построения гистограммы для ВСП взрослого мужчины приведен на рис. 2. Эти показатели, как и в существующих реализациях, отнесены к статической части комплекса, и на них мы останавливаться не будем.

Выбор параметра задержки мы решили сделать постоянным, реализовав в статическом режиме автокорреляционную функцию и функцию средней взаимной информации. Такое решение было принято из-за значительных изменений этого параметра даже при небольшом сдвиге (перемещении) окна. При этом, некоторые исследователи выбирают единичный параметр задержки [7], обуславливая полученные результаты пригодностью по мере стохастичности процесса. Примеры вычисления указанных функций для ряда ВСП приведены на рис. 3.

Графическая составляющая реализована в виде двух- и трехмерного восстановленного аттрактора. На рис. 4 приведен вид двухмерного аттрактора для системы Ресслера:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -y - z \\ \frac{dy}{dt} = x + ay \\ \frac{dz}{dt} = b + xz - cz \end{cases}$$

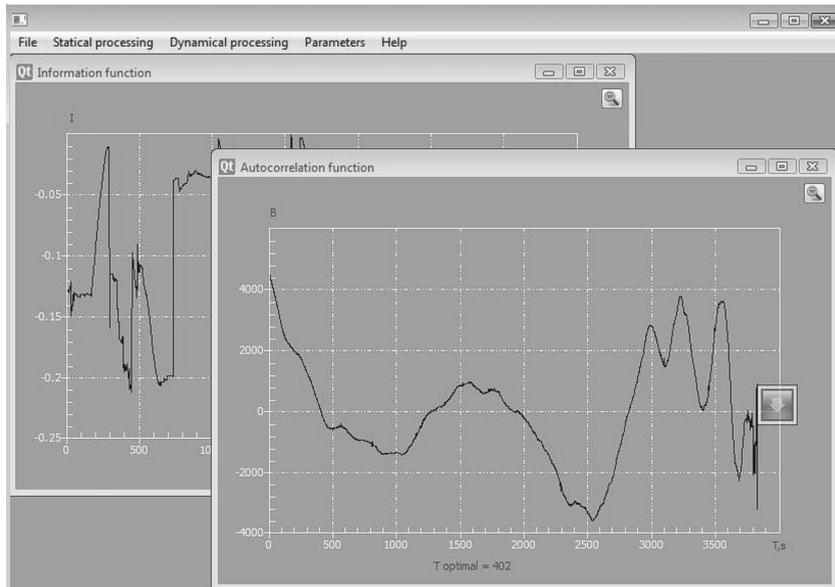


Рис. 3. Пример вычисления автокорреляционной функции и функции средней взаимной информации

при стандартных значениях параметров  $a = 0,2$ ,  $b = 0,2$ ,  $c = 5$ . Трехмерная графическая составляющая выполнена с помощью библиотеки компьютерной графики OpenGL; создано трехмерное фазовое пространство с изменением вида аттрактора в режиме реального времени, возможностью его наблюдения с любой точки пространства.

На рис. 5 приведен результат работы комплекса для трехмерного аттрактора системы Лоренца:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\sigma x + \sigma y \\ \frac{dy}{dt} = -xz + rx - y \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz \end{cases}$$

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

На рис. 6 приведен пример вычисления кор-

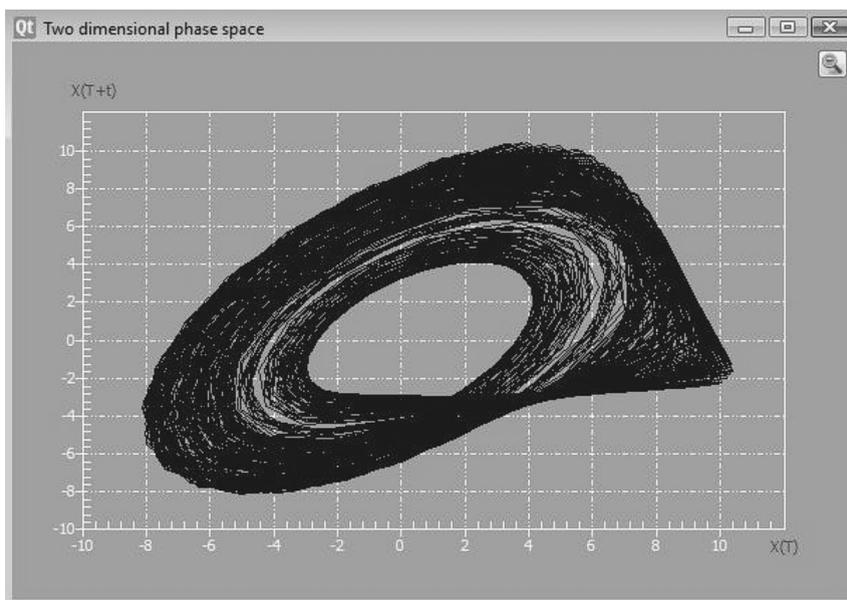


Рис. 4. Аттрактор Ресслера в двухмерном фазовом пространстве

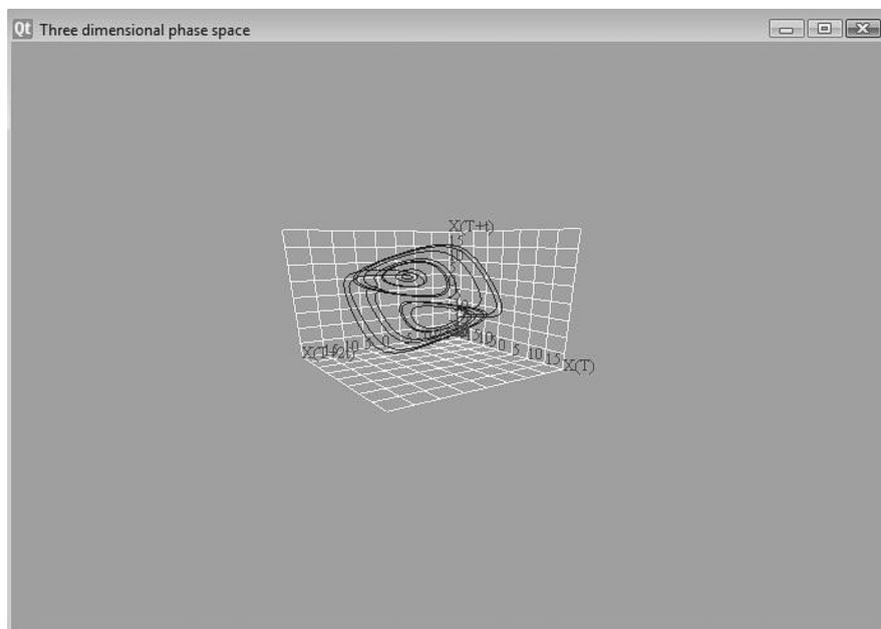


Рис. 5. Аттрактор Лоренца в трехмерном фазовом пространстве

реляционной размерности в режиме реального времени для аттрактора отображения Хенона [6, 7] в фазовом пространстве размерности 3, ширине окна равном 1000. Она равна значению 1,25, а диапазон изменения тренда находится в пределах 1,24–1,26, что говорит о справедливости работы предложенных нами вычислительных алгоритмов. Подобные результаты были получены для системы Лоренца, системы Ресслера, отображения Икеды и др.

На рис. 7 приведен пример вычисления корреляционной энтропии для аттрактора системы Лоренца. Полученное значение 0,5 в диапазоне изменения тренда 0,4–0,6 хорошо согласуется с результатами работы программы Fractan 4.4. (Результат работы Fractan 4.4 – 0,528 с погрешностью 0,08) Аналогичные результаты получены и для других решений известных систем нелинейных дифференциальных уравнений и отображений.

На рис. 8 приведен пример вычисления стар-

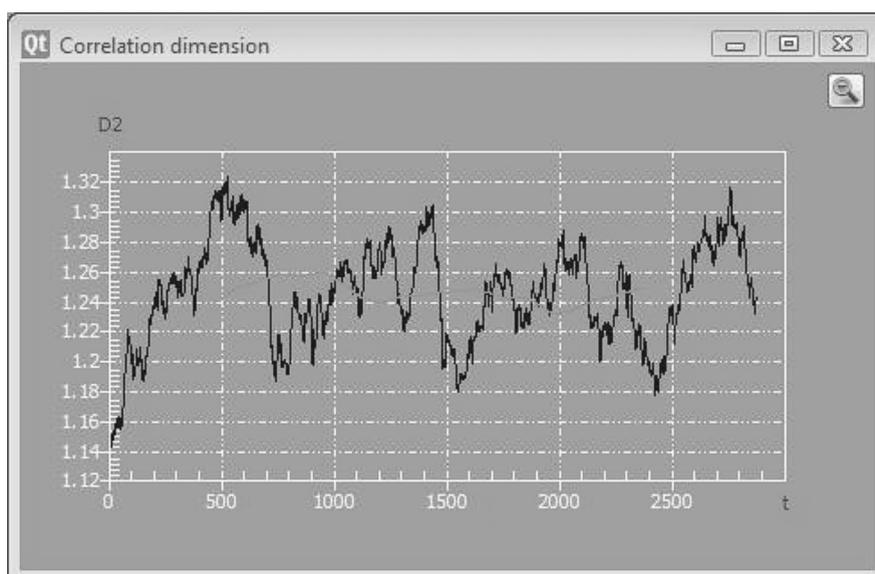


Рис. 6. Пример вычисления корреляционной размерности для отображения Хенона

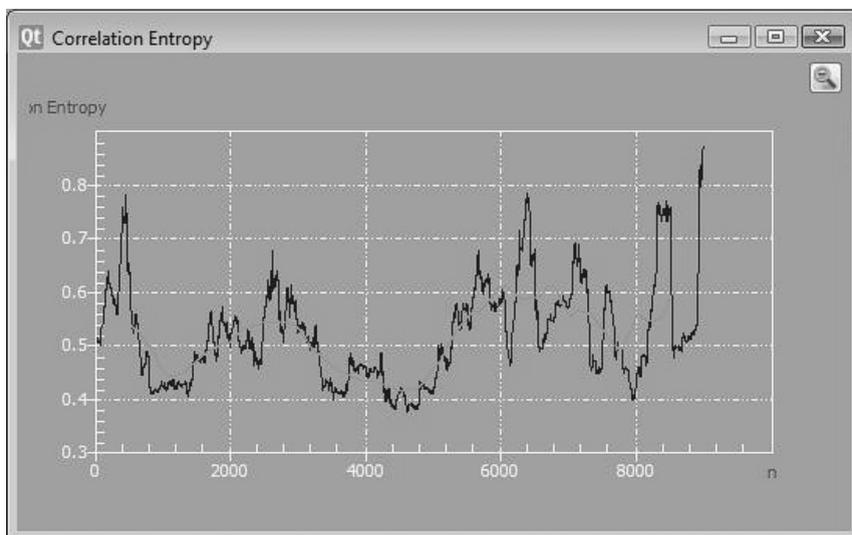


Рис. 7. Пример вычисления корреляционной энтропии для системы Лоренца

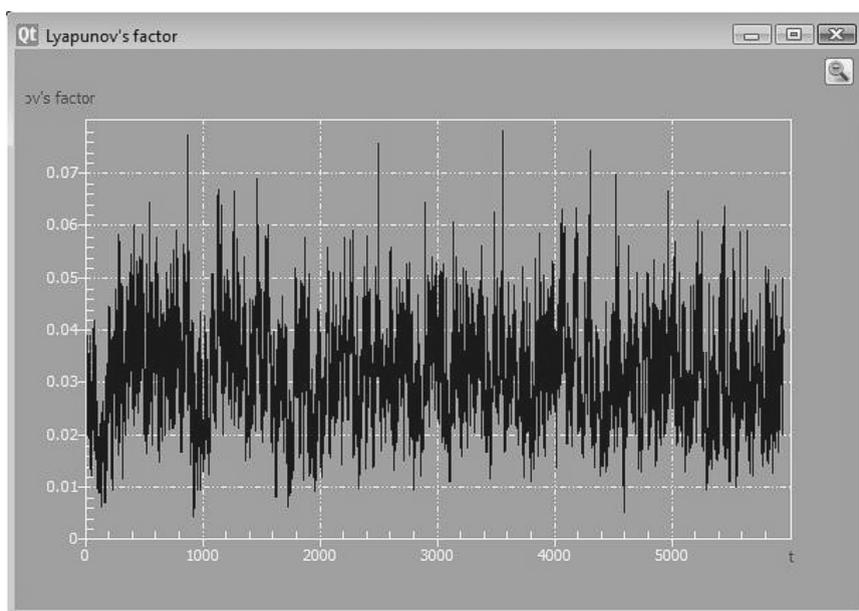


Рис. 8. Пример вычисления старшего показателя Ляпунова для системы Ресслера

шего показателя Ляпунова для системы Ресслера без выделения тренда. Полученные результаты говорят о слишком больших изменениях этого показателя даже при малых перемещениях окна.

В данной статье рассмотрен автоматизированный комплекс, способный в режиме реального времени вычислять наиболее известные фрактальные компоненты variability сердечного ритма, такие, как корреляционная размерность, аппроксимационная (корреляцион-

ная) энтропия, старший показатель Ляпунова, показатель Херста. Программная составляющая комплекса реализована на новейшей версии объектно-ориентированной библиотеки Qt 4.5.2, и использует, на наш взгляд, самые современные вычислительные процедуры. Надеемся, что описанный программный инструмент будет полезен для внедрения указанных характеристик в практическую клиническую медицину.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-08-01135-а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Антонов, В.И.** Динамический тренд корреляционной размерности как характеристический показатель жизнедеятельности организма [Текст]/В.И. Антонов, А.И. Загайнов, А.Н. Коваленко//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–СПб.:Изд-во СПбГПУ, 2009.–№ 6(91).–С. 111–119.
2. **Анищенко, В.С.** Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах [Текст]/В.С. Анищенко, В.В. Астахов, Т.Е. Вадивасова [и др.]//Институт компьютерных исследований.–Москва-Ижевск, 2003.–С. 544.
3. **Баевский, Р.М.** Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем: Ч. 1 [Текст]/Р.М. Баевский, Г.Г. Иванов, А.П. Гаврилушкин [и др.]//Вестник аритмологии.–2002.–№ 24.–С. 65–86.
4. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology: Heart Rate Variability. Standards of Measurements Physiological Interpretation and Clinical Use//Circulation.–1996.–Vol. 93.–P. 1043–1065
5. **Колоцкий, А.К.** Исследование variability сердечного ритма при анализе аритмий [Текст]/А.К. Колоцкий, Г.Г. Иванов, В.Е. Дворников [и др.]//Вестник Российского ун-та дружбы народов. Сер. Медицина.–2001.–№2.–С. 113–130.
6. **Махортых, С.А.** Алгоритмы вычисления характеристик стохастических сигналов и их применение к анализу электрофизиологических данных [Текст]/С.А. Махортых, В.В. Сычев//Abstracts. Nonlinear Phenomena in Biology. –Pushchino. –1998. –P. 33–34.
7. **Меклер, А.А.** Применение аппарата нелинейного анализа динамических систем для обработки сигналов ЭЭГ [Текст]/А.А. Меклер//Актуальный проблемы современной математики: ученые записки.–2004. –Т. 13(2).–С. 112–140.
8. **Рябыкина, Г.В.** Кардиология. Variability ритма сердца: Монография [Текст]/Г.В. Рябыкина, А.В. Соболев.–М.: СтарКо, 1998.–С. 200.
9. **Янсон, Н.Б.** Моделирование динамических систем по экспериментальным данным [Текст]/Н.Б. Янсон, В.С. Анищенко//Изв. вузов «ПНД».–1995.–Т. 3.–№ 3.–С. 112–121.

УДК 681.5

*В.Ф. Антонов*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЯТОРА ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

Область применения регуляторов прямого действия может быть достаточно широкой. Эти регуляторы управляют «активным» сечением канала теплоносителя и используются в различных системах подвода (отвода) тепловой энергии.

В статье приводится математическое описание регуляторов прямого действия, используемых для управления «живым» сечением каналов, а также показана процедура синтеза таких регуляторов.

Рассмотрим применение регуляторов прямого действия для системы управления температурным полем кожуха (рис. 1).

Математическая модель тепловых процессов внутри кожуха и конструкция кожуха описаны в [1]. Регулирование температурного поля внутри кожуха осуществляется путем изменения площа-

ди «живого» сечения отверстий выхода. Рассмотрим конструкцию регулятора прямого действия, позволяющего регулировать площадь «живого» сечения отверстий выхода.

Регулятор прямого действия – это физическое устройство, реализующее функции измерителя, вычислителя управляющего воздействия и устройства, реализующего входное воздействие на объект управления. Поскольку в практике имеется большое количество задач, связанных с управлением тепловыми процессами, то рассмотрим универсальное устройство, с помощью которого могут быть сконструированы регуляторы прямого действия для систем управления тепловыми процессами.

Конструктивная схема реализации регулятора прямого действия (рис. 2) состоит из корпуса

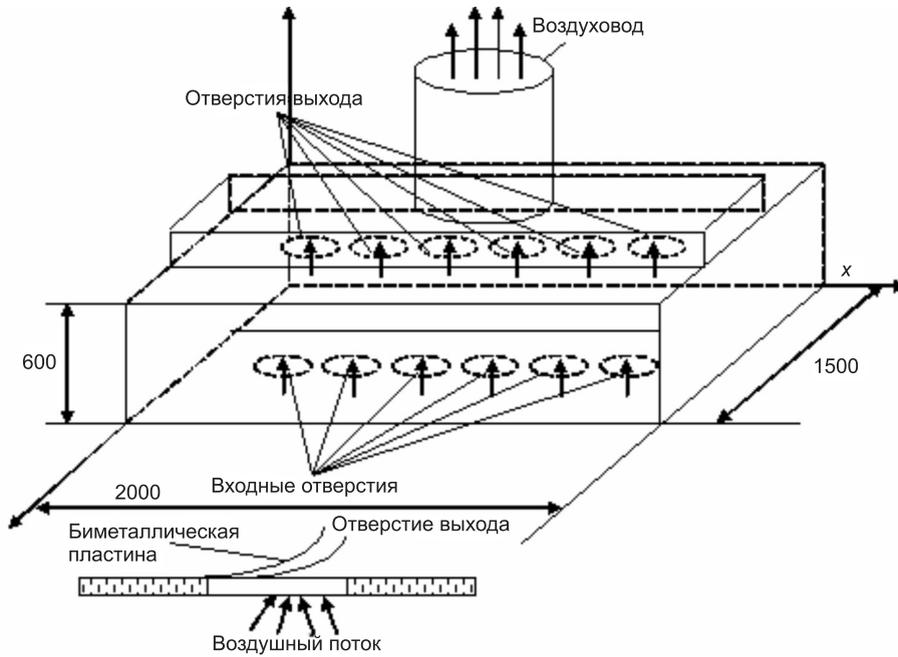


Рис. 1. Схема объекта управления

устройства – 1, на котором расположено отверстие выхода, закрытое подвижной крышкой – 2, имеющей шарнир – 3. На траверсе – 4 смонтирована биметаллическая пластина (БП) – 5, которая при перемещении открывает, либо закрывает крышку – 2. Для компенсации движения регулятора прямого действия в процессе разогрева до рабочего режима используется пружина – 6, установленная на оси, соединенной со свободным концом БП.

Основным элементом рассматриваемого регулятора служит БП, которая выполняет функции измерителя и исполнительного устройства – отклоняясь под действием температуры, перемещает ось (изменяя наклон подвижной крышки), регулируя «живое» сечение отверстия выхода.

Как известно, биметаллическая пластинка изготовлена из А – активного (обладающим боль-

шим коэффициентом теплового расширения и В – пассивного (обладающим малым коэффициентом расширения) материалов. Математическая модель тепловых процессов в БП может быть записана в виде

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right), \quad (i=1, 2, 3), \quad (1)$$

$$0 < x < L_x; \quad 0 < y < L_y; \quad Z_{i+1} < z < Z_i \quad (z_0 = 0),$$

где  $T_i(x, y, z, \tau)$  – температурное поле  $i$ -й среды ( $i=1$  – пограничный слой – воздух;  $i=2$  – материал А;  $i=3$  – материал В);  $a_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -й среды;  $L_x, L_y, Z_i$  – заданные значения (координаты границ раздела сред).

Граничные условия для системы уравнений (1), отражающие неразрывность тепловых по-

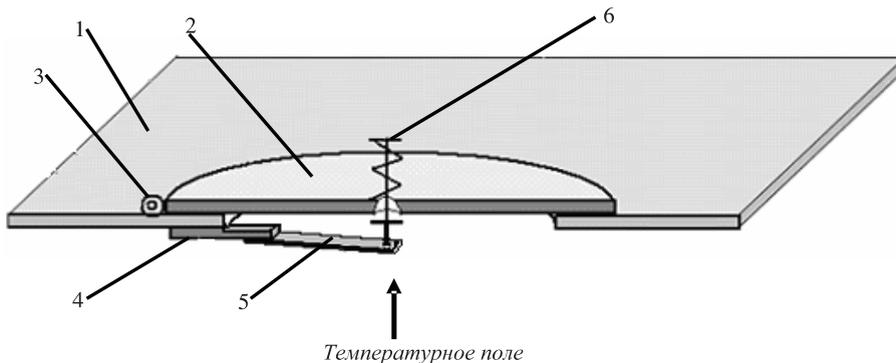


Рис. 2. Техническая реализация регулятора прямого действия

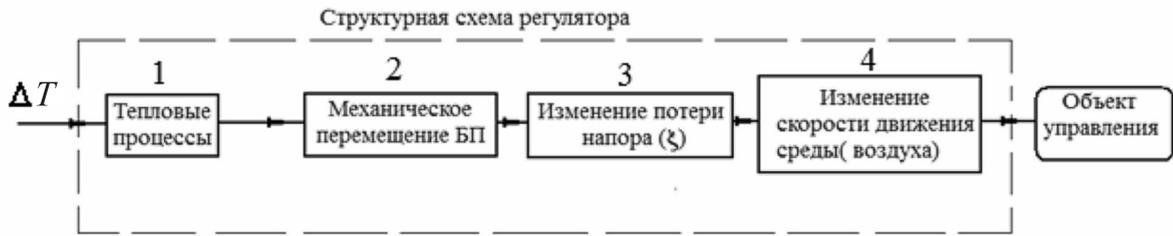


Рис. 3. Структурная схема регулятора прямого действия

лей и тепловых потоков на границах раздела сред, записываются в виде следующих соотношений:

$$T_1(x, y, 0, \tau) = T_{cp}(x, y, z_c, \tau), (z_c = 0);$$

$$T_i(x, y, z_i, \tau) = T_{i+1}(x, y, z_i, \tau), (i = 1, 2). \quad (2)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i(x, y, z_i, \tau)}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(x, y, z_i, \tau)}{\partial z},$$

$$(i = 1, 2); 0 < x < L_x; 0 < y < L_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_2(x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0, x=L_x}, \quad z_1 < z < z_2; 0 < y < L_y;$$

$$\frac{\partial T_3(x, y, z_3, \tau)}{\partial z} = 0, \quad 0 < x < L_x; 0 < y < L_y;$$

$$\frac{\partial T_3(x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0, x=L_x}, \quad z_2 < z < z_3; 0 < y < L_y;$$

$$\frac{\partial T_3(x, y, z_3, \tau)}{\partial y} = 0 \Big|_{y=0, y=L_y}, \quad z_2 < z < z_3; 0 < x < L_x,$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -й среды ( $i = 1, 3$ ).

В [2, 3] исследованы динамические характеристики рассматриваемого регулятора, которые описываются в виде процесса изменения теплового поля (см. математическую модель, приведенную выше), следствием которого будет механическое перемещение. Структурная схема

рассматриваемого регулятора прямого действия приведена на рис. 3.

Комплексный передаточный коэффициент тепловых процессов, записанный с учетом обобщенной координаты, может быть представлен в виде [2, 3]:

$$W(G, S) = \frac{\exp\left(\beta(G, S) \cdot \frac{L_z}{4}\right) + \exp\left(-\beta(G, S) \cdot \frac{L_z}{4}\right)}{\lambda \cdot (\exp(\beta(G, S) \cdot L_z) - \exp(-\beta(G, S) \cdot L_z)) \cdot \beta(G, S)} \quad (4)$$

где  $S = j\omega$ ,  $\beta(G, S) = \left(\frac{S}{a} + G\right)^{1/2}$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности материала БП,  $m^2/s$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала,  $Вт/м \cdot град$ ;  $G$  – обобщенная координата;  $\omega$  – круговая частота;  $L_z$  – толщина БП,  $мм$ .

Механические перемещения БП могут быть представлены в виде графика (рис. 4).

Для пояснения принципа работы регулятора (одного регулятора прямого действия), рассмотрим в качестве примера устройство для регулирования температуры воздуха (рис. 5), которое работает следующим образом: в объеме – 1, воздух нагревается источником тепловой энергии, это приводит к перепаду давления внутри и вне объема.

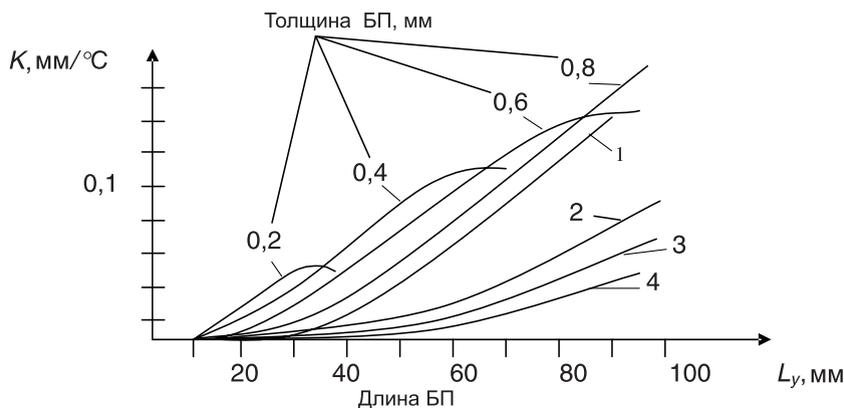


Рис. 4. Графики коэффициентов усиления блока 2

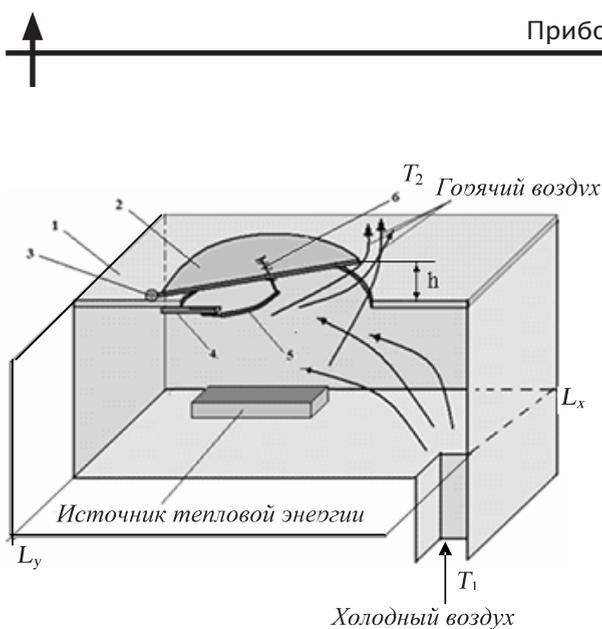


Рис. 5. Схема устройства

Перепад давления может быть вычислен с использованием следующего соотношения [2, 3].

$$\Delta P = ([Z_1 / 2] \cdot \mu \cdot g \cdot \rho) \Delta T \text{ или } \Delta P = K_1 \cdot \Delta T, \quad (5)$$

где  $Z_1$  – геометрический размер оболочки, м;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta T = T_2 - T_1$ ,  $T_1$  – температура холодного воздуха, 0°С;  $T_2$  – температура горячего воздуха, К;  $\mu$  – коэффициент объемного расширения теплоносителя;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $K_1 = ([Z_1 / 2] \cdot \mu \cdot g \cdot \rho)$  – постоянный коэффициент, определяемый конструктивными размерами устройства и параметрами теплоносителя.

Скорость движения воздуха через верхнее отверстие определяется из следующего соотношения:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{(1 + \xi) \rho}}, \quad (6)$$

где  $\xi$  – потери напора вследствие изменения «живого» сечения.

На сегодняшний день определение потерь напора получено только для некоторых стандартных случаев, при этом эти соотношения выведены из экспериментальных исследований [2]. Рассмотрим соотношение, полученное в ЦАГИ [5] для определения потери напора при движении воздуха по воздуховоду:

$$\xi = \left(1 + \frac{0,707}{\sqrt{1 - \frac{S_2}{S_1}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right)^2, \quad (7)$$

где  $S_1$  – площадь поперечного сечения нижней части устройства (в рассматриваемом случае она равна  $S_1 = L_x \cdot L_y$ );  $S_2$  – площадь поперечного сечения сжатой струи (в нашем случае – площадь «живого» сечения). Как правило,  $S_1$  (площадь поперечного сечения нижней части устройства) намного больше  $S_2$  (площади «живого» сечения).

Преобразуя указанную формулу, и полагая  $S_1$  много  $\geq S_2$ , получим

$$\xi = 1,707^2 \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right)^2, \quad S_2 \leq \pi \cdot R^2. \quad (8)$$

Определить площадь живого сечения при перемещении подвижной крышки (см. рис. 2), достаточно сложно, поскольку это связано с направлением движения воздушных потоков. В рассматриваемом случае площадь «живого» сечения определяется как площадь  $S_p$  (рис. 6) зазора между отверстием и крышкой, состоящей из двух равных секторов. Площадь одного сектора будем определять следующим образом:  $S_p = \pi \cdot R \cdot h / 2$ . Окончательная формула для расчета площади «живого» сечения может быть определена из следующего соотношения:

$$S_2 = 2 \cdot S_p = \pi R h, \quad (9)$$

где  $R$  – радиус отверстия выхода, м;  $h$  – высота поднятия крышки, м.

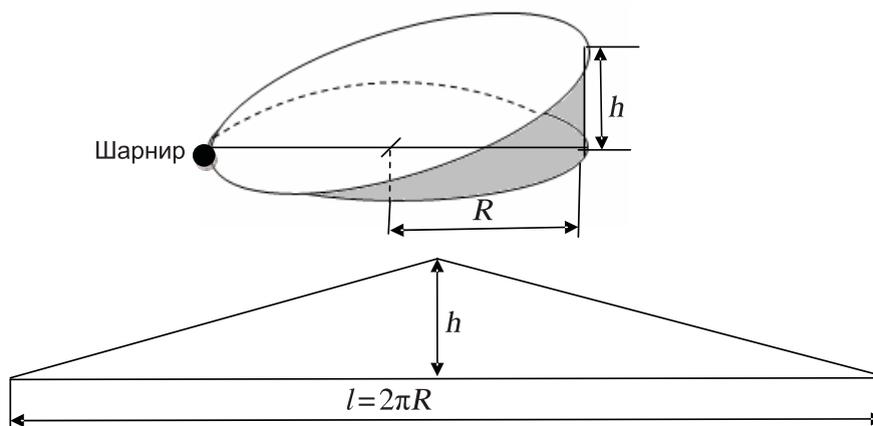


Рис. 6. Схема площади зазора между отверстием и крышкой

Полагая  $h = 2 * L_s$  ( $L_s$  – перемещение свободного конца БП) и  $(\frac{S_1}{S_2} - 1)^2 \approx (\frac{S_1}{S_2})^2$ , получим:

$$\xi = 1,707^2 \cdot (\frac{S_1}{\pi R \cdot 2 \cdot h})^2, 2h \leq R. \quad (10)$$

Рассмотрим оценку количества тепла  $q$ , проходящего через отверстие с данным регулятором за единицу времени (с). Температура воздуха, выходящего через отверстие, равна  $T_2$ , скорость движения  $v$ , а теплоемкость воздуха  $C$ , тогда  $q = v \cdot \pi \cdot 2 \cdot h \cdot \rho \cdot C \cdot \Delta T$ .

Наибольшее количество тепла  $q^*$  будет проходить через отверстие, когда оно полностью открыто:

$$q^* = (Z_1 \bar{\mu} g \Delta T^3)^{0,5} \cdot \pi R^2 \rho C. \quad (11)$$

Полагая, что весь тепловой поток ( $q^*$ ) идет для нагрева воздуха, радиус отверстия для установки регулятора прямого действия определяется из следующего соотношения

$$R = (q^* / ((Z_1 \bar{\mu} g \Delta T^3)^{0,5} \cdot \pi \rho C))^{0,5}. \quad (12)$$

*Постановка задачи:* требуется синтезировать регулятор прямого действия для системы управления температурным полем устройства, приведенного на рис. 1.

*Методика* синтеза системы управления состоит из следующих этапов.

1. *Определим геометрические размеры ( $R$ ) отверстий выхода.* В рассматриваемой установке их шесть ( $n = 6$ ). Подставляя исходные данные  $Z_1 = 1$  м,  $q^* = 11,1$  Вт,  $\mu = 2,83 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $g = 9,81$  м<sup>2</sup>/с,  $\Delta T = 50$  К,  $\rho = 0,94$  кг/м<sup>3</sup>,  $C = 1,009$  кДж/кг·К в соотношение (12), и полагая, что весь тепловой поток ( $q^*$ ) идет для нагрева воздуха, вычислим радиус отверстий выхода  $R = (11,1 \cdot 10^{-3} / (1 \cdot 2,83 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8150^3)^{0,5} \cdot 3,14 \times 0,94 \cdot 1,009)^{0,5} = 0,024036$  м.

2. *Синтезируем регулятор в виде усилительного звена.* Частотная методика определения параметров БП исходя из устойчивости системы управления, показана в [1, 3]. При этом следует учитывать что перемещение свободного конца БП  $L_s$  связано с величиной  $h$  соотношением  $h = 2 * L_s$ .

В данной статье исследована конструкция распределенного регулятора прямого действия, показан принцип работы. Разработана математическая модель рассматриваемого регулятора. Выведены зависимости, связывающие геометрические размеры регулятора с тепловым потоком  $q^*$ .

Используя полученные зависимости, можно рассчитать параметры регулятора прямого действия для управления температурными полями, при которых гарантировано устойчивое функционирование системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.–2010.–№ 6 (113).–С. 151–155.  
2. **Бутковский, А.Г.** Характеристики систем с распределёнными параметрами [Текст]/А.Г. Бутковский.–М.: Наука, 1979.–224 с.

3. **Першин, И.М.** Анализ и синтез систем с распределёнными параметрами [Текст]/И.М. Першин.–Пятигорск: РИА на КМВ, 2007.–244 с.  
4. **Першин, И.М.** Синтез систем с распределёнными параметрами [Текст]/И.М. Першин.–Пятигорск: РИА на КМВ, 2002.–212 с.  
5. Теплотехнический справочник [Текст]/Под общ. ред. В.Н. Юренев, П.Д. Лебедев.–М.: Энергия, 1976.–В 2 т; Т. 2.–2-е изд., перераб.–896 с.

УДК 004.4'22

О.Х. Бостонов

## СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Современные CASE-средства охватывают обширную область поддержки многочисленных

технологий проектирования информационных систем (ИС): от простых средств анализа и до-

кументирования до полномасштабных средств автоматизации, покрывающих весь жизненный цикл программного обеспечения (ПО).

Наиболее трудоемкими этапами разработки ИС являются этапы анализа и проектирования, в процессе которых CASE-средства обеспечивают качество принимаемых технических решений и подготовку проектной документации [1]. Использование методов визуального представления информации предполагает построение структурных или иных диаграмм в реальном масштабе времени, применение многообразной цветовой палитры, сквозную проверку синтаксических правил. Графические средства моделирования предметной области позволяют специалистам в наглядном виде изучать существующую ИС, вносить в нее изменения в соответствии с поставленными целями и имеющимися ограничениями.

Как правило, для автоматизации бизнес-процессов на предприятии используется несколько приложений.

В представленной статье рассматривается отдел анализа разработки нефтяных месторождений, который в своей работе использует несколько информационных систем. При эксплуатации данных информационных систем были выявлены трудности при их совместном использовании.

Проблема заключается в том, что неактуальность и несогласованность данных в приложениях, применяемых специалистами отдела при работе над совместным проектом, приводит к рассогласованности действий, снижению производительности труда и ошибкам.

Для решения этой проблемы требуется обеспечить интеграцию существующих информационных систем с целью обеспечения между ними своевременного обмена информацией об изменениях в данных. При этом необходимо сохранить общую согласованность данных.

Уже используемые в отделе приложения, предназначенные для передачи и конвертации данных из одного приложения в другое, не соответствуют указанным выше требованиям и не

способны обеспечить автоматической поддержки глобальной целостности и актуальности данных.

Эта проблема свойственна не только рассматриваемому в рамках статьи предприятию, но и любому предприятию, для автоматизации деятельности которого используется несколько информационных систем.

Поэтому существует необходимость в создании нового подхода к интеграции информационных систем, обеспечивающего глобальную целостность и согласованность данных, и позволяющего сотрудникам качественно и своевременно выполнять свою работу.

Инструментальное средство поддержки проектирования взаимодействия информационных систем существенно облегчило бы решение данной задачи. Его использование позволило бы снизить расходы на создание и сопровождение интеграционного решения, быстрее реагировать на изменения в деятельности предприятия.

Автор предлагает использовать метод полисемической декомпозиции при проектировании интеграционного решения для ОТС предприятия.

Метод полисемической декомпозиции содержит четыре этапа проектирования интеграционного решения (рис. 1):

- а) понятия предметной области формализуются на метаязыке проектирования;
- б) понятия группируются в множества и образуют прикладные языки проектной области;
- с) семантика этих языков формализуется в виде правил соответствия понятий, их проверки и преобразования;
- д) при изменении предложений на прикладных языках семантические процессоры автоматически выполняют их проверку, согласование и преобразование понятий.

Интегрируемые информационные системы описываются рядом моделей, которые должны быть согласованы, обладать свойствами целостности и непротиворечивости. Метод полисемической декомпозиции позволяет рассматривать эти модели как предложения и успешно согласовывать связанные понятия разных моделей [2].

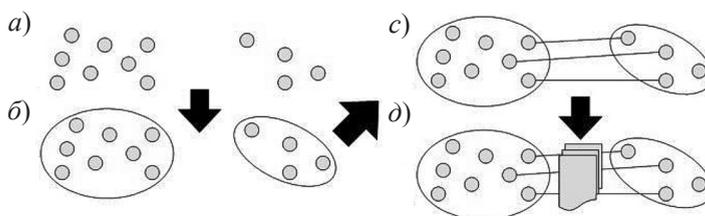


Рис. 1. Этапы метода полисемической декомпозиции

Для того, чтобы ИС могли быть использованы в составе интеграционного решения, они должны соответствовать следующим требованиям:

в основе ИС должна использоваться какая-либо СУБД

в тезаурусе ИС должны быть понятия, синонимичные понятиям, содержащимся в тезаурусах других ИС, входящих в состав интеграционного решения;

ИС должна предоставлять внешний интерфейс взаимодействия на уровне СУБД.

Предлагаемая в данной статье методика основывается на методе полисемической декомпозиции и включает в себя следующие этапы.

1. Описание набора ИС.

2. Описание понятий, входящих в состав ИС и обладающих свойством полисемии.

3. Описание связи между понятиями и процедуры обеспечения целостности для объектов, соответствующих полисемическим понятиям.

4. Реализация промежуточного ПО, обеспечивающего обмен данными и глобальную целостность информации на основе сформированных правил.

Автором было создано CASE-средство, позволяющее в автоматизированном режиме проектировать программное обеспечение промежуточного уровня для интеграции информационных систем.

Согласно методу полисемической декомпозиции необходимо формализовать понятия предметной области на метаязыке проектирования.

Полученные понятия затем группируются в множества и образуют прикладные языки проектной области.

Схема, описывающая взаимосвязи между информационными системами «ГИС5» и «ГисОбъект», созданная при помощи CASE-средства, представлена на рис. 2.

Были выделены следующие понятия: «Координаты», «Исследования», «Координаты пересечения». Далее понятия сгруппированы в два множества, каждое из которых соответствует одной из интегрируемых информационных систем и представлено объектом типа «модуль».

В соответствии с третьим пунктом метода полисемической декомпозиции, необходимо описать связи между понятиями и процедуры обеспечения целостности для объектов, соответствующих полисемическим понятиям.

Линия на рис. 2 обозначает соответствие между понятиями «Координаты» и «Координаты пересечения». Объект «Преобразование», расположенный по центру линии, содержит в себе правила, в соответствии с которыми данные понятия «Координаты» могут быть проверены и преобразованы в данные понятия «Координаты пересечения».

В итоговой схеме взаимосвязей ИС для рассматриваемого предприятия выделили два подмножества и четыре сущности. Установили связи между понятиями, обладающими свойством полисемии (рис. 3).

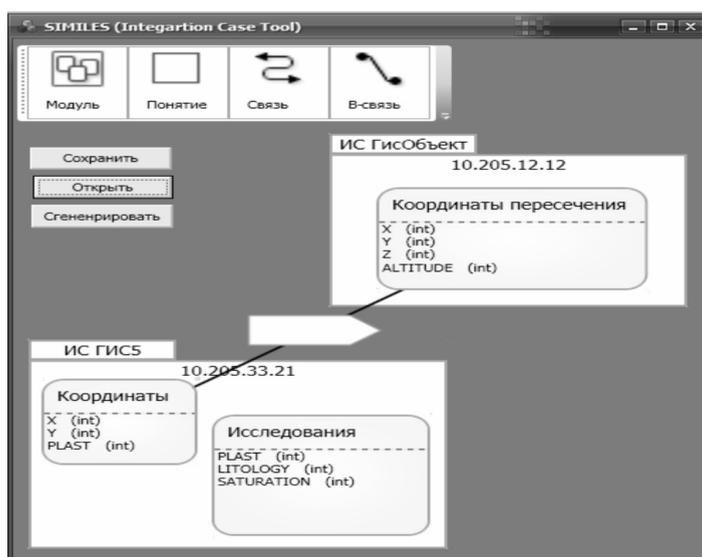


Рис. 2. Схема взаимосвязей между интегрируемыми информационными системами

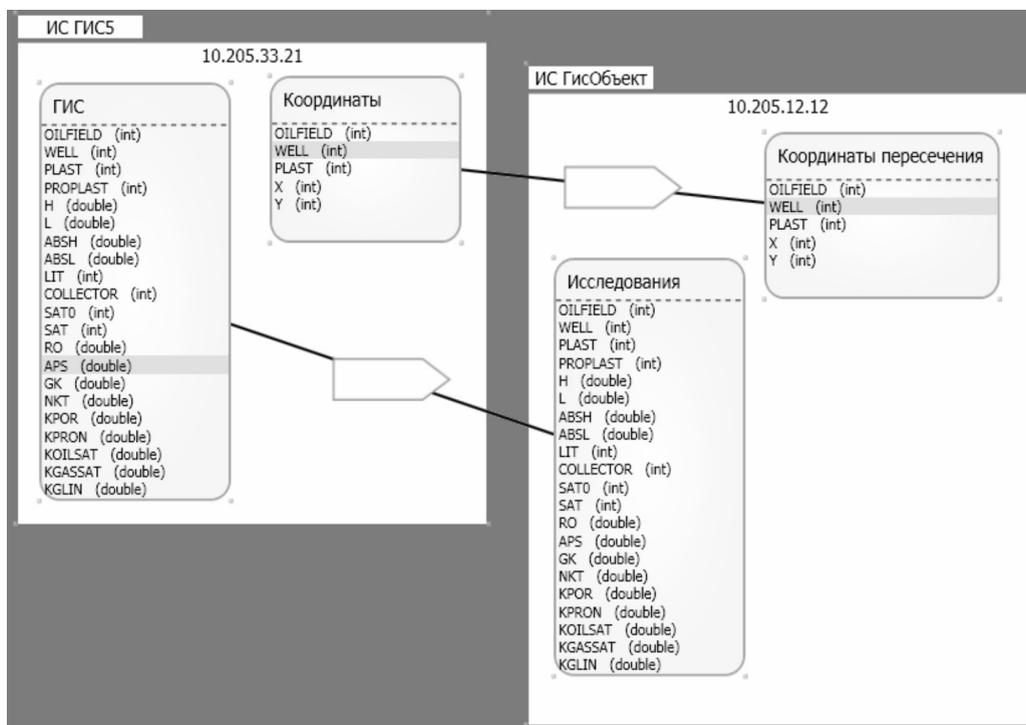


Рис. 3. Схема взаимосвязей между интегрируемыми информационными системами для рассматриваемого предприятия

На основе полученной схемы существует возможность реализации ПО промежуточного уровня для интеграции информационных систем.

Для того чтобы обеспечить гибкость и масштабируемость интеграционного решения, а также взаимозаменяемость используемых подсистем, было принято решение использовать в качестве архитектуры сервисную шину предприятия (ESB, Enterprise Service Bus) и в качестве технологии, соответственно, обмен сообщениями.

Общая архитектура интеграционного решения представлена на рис. 4.

Для наиболее распространенных СУБД и источников данных были реализованы адаптеры. Для «ГИС5» использован текстовый, а для «ГисОбъект» – ORACLE-адаптер. Назначение адаптера – в обеспечении взаимодействия конкретной ИС с интеграционным решением.

Входящий в состав CASE-средства программный модуль «Генерация» генерирует на основе созданной схемы основные классы, предназначенные для отправки и обработки сообщений для каждого из адаптеров, конфигурирует систему подписки на необходимые сообщения. Это позволяет облегчить работу разработчика при создании и корректировке интеграционного решения. На-

пример, при добавлении новой ИС существует возможность воспользоваться сохраненной схемой взаимосвязей. Добавив новый объект типа «модуль», необходимо определить понятия и связи для новой системы и затем вновь воспользоваться модулем «Генерация».

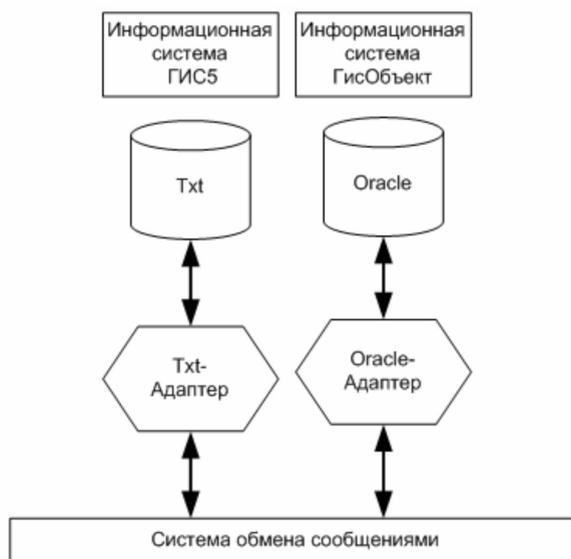


Рис. 4. Архитектура предлагаемого интеграционного решения

Внедрение данного CASE-средства помогло упростить процесс создания и сопровождения интеграционного решения для рассматриваемого предприятия. Использование полученного интеграционного решения позволило снизить ко-

личество трудозатрат на обработку, проверку и передачу данных между интегрируемыми приложениями, а также обеспечило оперативность обмена информацией и выполнение ограничений глобальной целостности и актуальности данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вендров, А.М.** Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем [Текст]/А.М. Вендров.–М.: Финансы и статистика. –2005.–С. 365–366.
2. **Тюрганов, А.Г.** Формализованные понятий-

ные модели для проектирования организационно-технических систем [Текст]/А.Г. Тюрганов//Сб. науч. тр. X национальной науч.-техн. конф. РАИИ с межд. участием «КИИ-2006».–М.: Физматлит, 2006.–Т. 1.–С. 183–188.

## НАНОЭЛЕКТРОНИКА – ОСНОВА КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОТЕХНИКИ

Прошло сорок пять лет с момента опубликования Г. Муром статьи, в которой автор сформулировал закон изменения плотности упаковки элементов на кристалле в зависимости от времени: число транзисторов на кристалле микросхемы удваивается каждый год, точнее – примерно каждые два года [1, 2]. В 1965 г. минимально разрешимые технологические размеры транзисторов составляли единицы микрон. На сегодняшний день лидирующие компании-производители полупроводниковых изделий обеспечивают разрешение до 35 нм и проводят исследования по разработке технологий с разрешением до 22 нм. Таким образом, за прошедшие почти полвека достигнутые результаты в области физики и технологии полупроводников не только подтвердили справедливость предположения, сделанного Г. Муром, но и определили переход от микро- к нанoeлектронике. В условиях открытого рынка развитие отечественной нанoeлектронной компонентной базы представляет проблему, решение которой во многом формирует состояние дел в области радиотехнических, телекоммуникационных, навигационных, вычислительных систем. Следует отметить, что по-прежнему доминирующим типом технологии производства цифровых и аналого-цифровых устройств нанoeлектроники является «комплементарная металл-оксид-полупроводник» (КМОП) технология на основе кремниевых кристаллов. Именно поэтому особое внимание в настоящей статье уделяется реализациям по КМОП-технологии.

В целом, в публикации обобщаются результаты многолетней научно-исследовательской и практической работы авторов по разработке нанoeлектронной компонентной базы, преимущественно для устройств радиосвязи. В первой гла-

ве приводятся краткие сведения о современных устройствах радиосвязи, во второй рассматриваются вопросы построения высокочастотных аналоговых устройств, в третьей – низкочастотных аналоговых устройств. Четвертая глава посвящена реализациям аналого-цифровых преобразователей. В заключении приведены основные выводы.

### 1. Принципы построения интегральных приемников систем радиосвязи

Доминирующим типом архитектуры интегральных приемников систем радиосвязи, например, GSM, WLAN, DECT, Bluetooth, является так называемая *гомодинная схема приемника* с однократным преобразованием входного сигнала в область низких частот, в пределе – на постоянный ток. В совокупности с квадратурной обработкой такой подход решает одну из ключевых проблем, связанную с обеспечением селективности приемника на промежуточной частоте: позволяет осуществить выделение полосы частот модуляции с помощью интегрального фильтра нижних частот (ФНЧ), в отличие от традиционной архитектуры супергетеродинных приемников с двойным преобразованием, в которых выделение рабочей полосы частот в тракте промежуточных частот осуществляется полосовым фильтром (ПФ). Реализация сравнительно высокочастотного ПФ с высокой избирательностью в интегральном исполнении до сих пор представляет известную проблему, вследствие чего ПФ выполняется в виде отдельного компонента, например, на основе резонатора на поверхностных акустических волнах, и не может быть включен в состав микросхемы. Таким образом, применение нетрадиционных структур радиоприемников исключает дорогостоящие и крупногабаритные ПФ и позволяет приблизиться

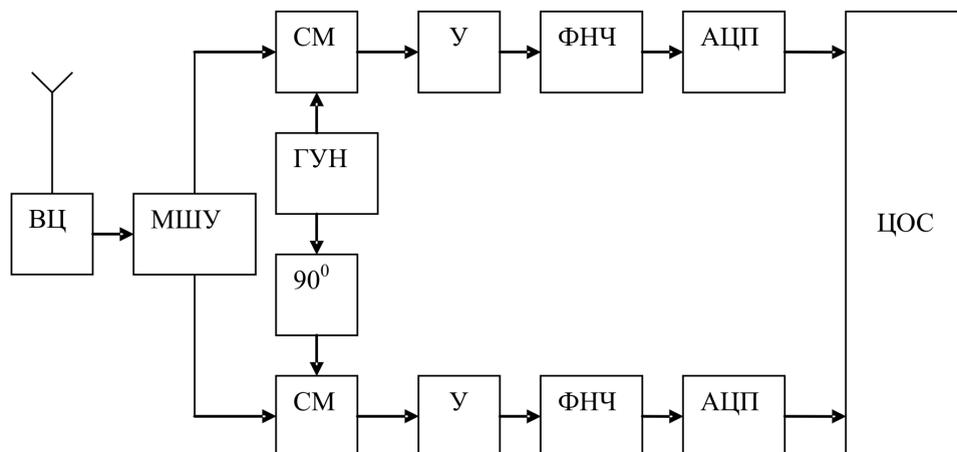


Рис. 1. Структурная схема гомодинного приемника

к реализации концепции «система на кристалле». Современные системы радиосвязи, как правило, интегрируют на кристалле как аналоговую, так и цифровую части, которые реализуются в виде полностью заказной микросхемы. Упрощенная структурная схема гомодинного приемника показана на рис. 1 и включает: сопряженную с антенной входную цепь (ВЦ), малошумящий усилитель (МШУ), смесители (СМ), гетеродин в виде генератора, управляемого напряжением (ГУН), низкочастотные усилители (У) с регулируемым усилением, ограничивающие каналные ФНЧ, аналого-цифровые преобразователи, блок цифровой обработки система (ЦОС) [3].

При разработке многофункционального приемника для поддержки стандартов с различными параметрами, приемник должен обладать высоким уровнем универсальности. Другими словами, на кристалле должны интегрироваться блоки многофункционального типа, обеспечивающие прием и обработку сигналов, по возможности, большего числа стандартов [4]. Таким образом, при любом варианте построения приемника кроме цифрового блока выделяются: высокочастотная аналоговая часть, низкочастотная аналоговая часть, аналого-цифровая часть – АЦП. Рассмотрим далее особенности построения перечисленных частей схемы.

## 2. Интегральные высокочастотные аналоговые устройства

**Малошумящий усилитель.** Первым каскадом приемного устройства, в значительной степени определяющим характеристики приемника в целом, является МШУ. Главное назначение

МШУ – увеличение отношения сигнал/шум и согласование приемного тракта с входной цепью. При разработке МШУ необходимо обеспечить низкий коэффициент шума, высокий коэффициент усиления, устойчивость, требуемую линейность и добиться согласования входного импеданса усилителя с импедансом источника сигнала, как правило, равным волновому сопротивлению тракта 50 Ом [5, 6]. Малошумящие усилители классифицируют на два основных класса: узкополосные – с полосами до 10–15 % от средней частоты полосы пропускания и широкополосные – с полосами более 20 %. Наиболее перспективная схема узкополосного усилителя – структура с включением транзистора с общим истоком и отрицательной индуктивной последовательной обратной связью по току. Данная структура позволяет реализовывать высокий коэффициент усиления (более 15 дБ) при низком коэффициенте шума (1–3 дБ) и малой потребляемой мощности (порядка 10 мВт) благодаря одновременному согласованию по шумам и по мощности. Подобная схема применяется в устройствах WLAN, GPS, GSM на частотах 2,4/5,2 ГГц, 1,5 ГГц, 0,9/1,8 ГГц соответственно.

Отметим, что в МОП-транзисторах с длиной канала менее 0,8 мкм рабочая точка приближается к напряжению отпираания, что приводит к эффектам, связанным с появлением диффузионной составляющей тока стока. В этой связи разработана методика параметрического синтеза с использованием процедур численной оптимизации и реализован МШУ с учетом паразитных составляющих МОП-транзисторов и диффузионной составляющей тока стока с рабочей частотой

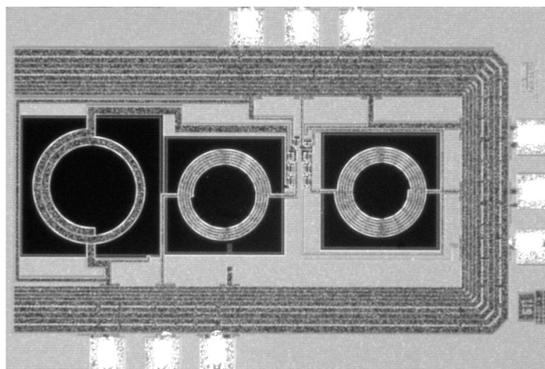
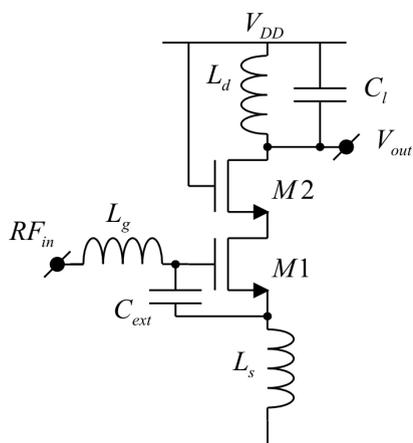


Рис. 2. Схема и микрофотография малошумящего усилителя

2,4 ГГц по КМОП-технологии компании UMC с разрешением 180 нм. Проведено моделирование усилителя с учетом паразитных элементов компоновки кристалла с использованием программной платформы Cadence Design Systems (Virtuoso). Изготовлена микросхема МШУ по программе EUROPRACTICE. При этом получены следующие результаты: параметры  $|S_{21}|$  и  $|S_{11}|$  составили 22 дБ и  $-30$  дБ соответственно при коэффициенте шума 2,9 дБ при потребляемой мощности 4 мВт [7]. Схема и микрофотография усилителя представлены на рис. 2. Площадь, занимаемая усилителем на кристалле, составила 1x1,5 кв. мм. Следует отметить включение в состав интегральной схемы планарных спиральных индуктивностей. Разработанный усилитель обеспечивает в два раза меньшую потребляемую мощность по сравнению с аналогичными реализациями.

**Смеситель.** Смеситель (преобразователь частоты) осуществляет преобразование высокочастотного входного сигнала в низкочастотный сигнал промежуточной частоты. В самом общем случае смесители классифицируются на две группы: диодные и транзисторные. Диодные отличаются малыми габаритными размерами и низким уровнем собственных шумов. Основное преимущество транзисторных – возможность не только преобразования, но и усиления сигналов.

В современных системах наибольшее распространение получили смесители на МОП-транзисторах по схеме Б. Гильберта. Главное достоинство схемы Б. Гильберта – высокий уровень развязки (до  $-60 \dots -80$  дБ) между всеми входами смесителя, что определяется двойной балансной

структурой схемы. Разработана схема смесителя на диапазон частот до 1,5–2,0 ГГц при использовании параметров КМОП-технологии компании UMC с разрешением 350 нм. Схема смесителя и компоновка кристалла интегральной схемы приведены на рис. 3. При потребляемом токе 1 мА и напряжении питания 2,5 В смеситель обеспечивает коэффициент передачи не менее 21 дБ при уровне третьей гармоники и  $-80 \dots -60$  дБ, амплитуде входного сигнала до 20 мВ и уровне собственных шумов  $47 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  в полосе рабочих частот до 2 ГГц. Уровень развязки составляет от  $-40$  дБ и более в зависимости от технологического разброса параметров транзисторов [8].

**Генератор, управляемый напряжением.** Гетеродин (формирователь опорного колебания) радиоприемника строится на основе синтезатора частот. Основным блоком синтезатора является автогенератор или, точнее, ГУН. К основным характеристикам ГУН относят: диапазон рабочих частот, диапазон перестройки по частоте, уровень фазовых шумов. Наиболее широкое распространение в системах радиосвязи получили ГУН по так называемой *трехточечной схеме* LC-автогенераторов в дифференциальном включении на элементной базе МОП-технологии (рис. 4).

Разработан ГУН с частотой колебания 2,5 ГГц при использовании параметров КМОП-технологии компании UMC с разрешением 350 нм. Значения планарных индуктивностей составили 3,5 нГн при добротности 10. При питании +2,5 В ток, потребляемый схемой, составил 1,4 мА, амплитуда колебаний 400 мВ при уровне третьей гармоники менее 0,5 мВ. При отстройке от несущей

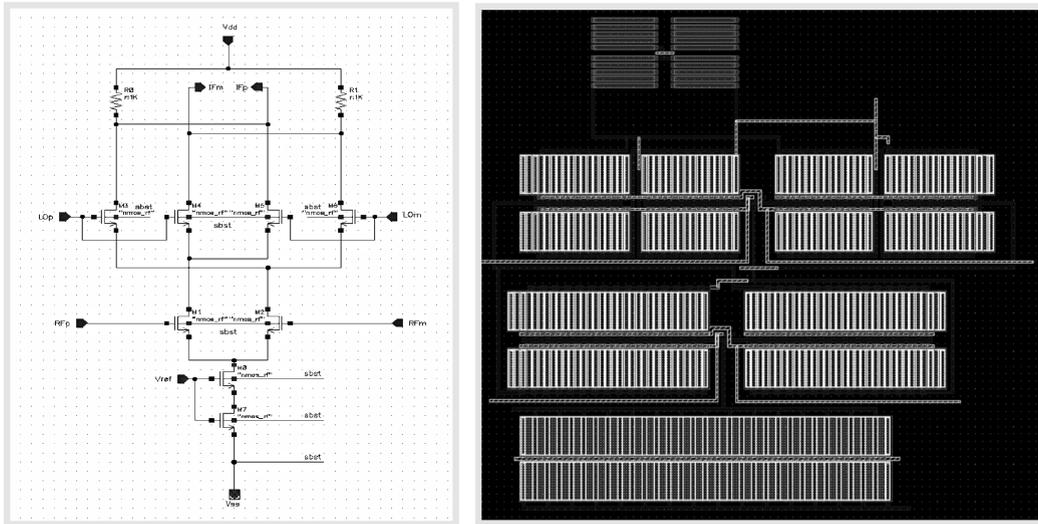


Рис. 3. Схема смесителя и компоновка кристалла интегральной схемы

100 кГц уровень фазовых шумов автогенератора составил  $-100$  дБ/Гц, что соответствует спецификации стандарта WLAN. Разработанная схема предназначена для использования в составе петли фазовой автоподстройки по частоте (ФАПЧ) синтезатора частот формирователя опорного колебания. Синтезаторы частот на основе системы ФАПЧ классифицируются на две основные группы: с целочисленным коэффициентом деления и дробным коэффициентом деления частоты [9]. Несмотря на широкое применение синтезаторов первой группы на практике, имеются определенные недостатки, к которым относятся:

1) ограниченное разрешение по частоте перестройки, определяемое низкой частотой сравне-

ния при высоком коэффициенте деления;

2) из-за низкой частоты сравнения полоса пропускания ФНЧ в петле ФАПЧ должна быть узкой. Как следствие, время установления системы ФАПЧ велико, что критично для получивших широкое распространение систем, в частности, мобильных, со скачкообразным изменением частоты;

3) из-за высокого коэффициента деления возрастает уровень фазовых шумов, пропорциональный коэффициенту деления в области малых отстроек по частоте.

В синтезаторах второй группы с дробным коэффициентом деления достигается высокое разрешение при высокой частоте сравнения, что является серьезным преимуществом. Наиболее

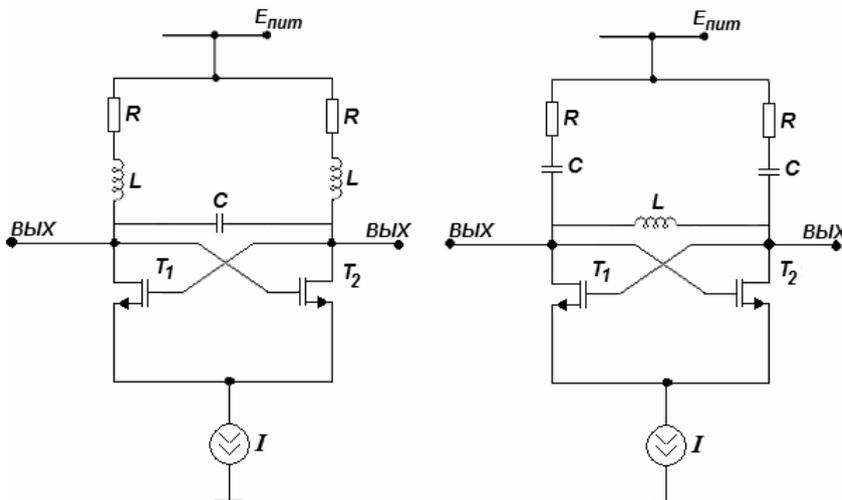


Рис. 4. Индуктивная и емкостная эквивалентные схемы трехточечного автогенератора по переменному току при балансном включении

эффективны синтезаторы с дробным коэффициентом деления, которые строятся с использованием дельта-сигма модуляторов.

### 3. Интегральные низкочастотные аналоговые устройства

**Фильтры.** В современных системах не используются ставшие уже классическими гибридные микросхемы ARC-фильтров, вытесненные схемами, ориентированными на изготовление по КМОП-технологии: фильтрами на переключаемых конденсаторах (SC-фильтрами) и фильтрами на основе транскондуктивных усилителей ( $G_m$ -C фильтрами) [10]. SC-фильтры, в основном, применяются в диапазоне частот до сотен кГц, поскольку возможности расширения рабочих частот ограничены скоростными и частотными свойствами операционных усилителей (ОУ). Построение SC-схемы в диапазоне более 100 кГц требует применения ОУ с площадью усиления не менее 5–7 МГц. В общем случае могут быть разработаны КМОП-усилители не только с подобными, но и с лучшими характеристиками. Однако потребляемая мощность, площадь на кристалле, а, следовательно, и стоимость широкополосных ОУ существенно возрастают. В этой связи на частотах от единиц МГц и выше нашли применение  $G_m$ -C фильтры. Реализация транскондуктивных усилителей (ТУ) не требует введения в схему специальных корректирующих конденсаторов, искусственно ограничивающих полосу усиления, поскольку отсутствует необходимость в получении высокого коэффициента усиления по напряжению. Но принципиально включение в состав фильтра специальной системы автоподстройки, корректирующей постоянные времени фильтра. К функциям,

выполняемым фильтрами в системах проводной и мобильной связи, относятся: ограничение полосы частот; выделение основного канала частот; коррекция импульсного сигнала; селекция тонального сигнала и поднесущих частот. При этом наиболее практически значимыми типами фильтров являются ФНЧ и ПФ. Особенность – высокие требования к точности частотных характеристик фильтров: возможные изменения параметров, как правило, не должны превышать единиц процентов от расчетных значений.

Разработаны различные типы канальных фильтров для приемных устройств систем связи на переключаемых конденсаторах и транскондуктивных усилителях [10–13]. В качестве примера на рис. 5 приведены микрофотографии SC-фильтра и  $G_m$ -C фильтра пятого порядка с частотой среза 1 МГц. Фильтры реализованы по КМОП-технологии с разрешением 350 нм. Потребляемая мощность составляет порядка 10–11 мВт, уровень третьей гармоники –54 дБ при амплитуде входного сигнала на частоте среза 1 В.

**Усилители.** Низкочастотные усилители, как правило, разрабатываются на основе ТУ с регулировкой параметра передаточной проводимости  $G_m$ , которая определяется как отношение выходного тока схемы к входному напряжению. Транскондуктивный усилитель представляет источник тока, управляемый напряжением. Основная задача, которая решается при создании ТУ – уменьшение уровня нелинейных искажений при малой потребляемой мощности [14–16]. Разработан ряд схем ТУ, одна из которых приведена на рис. 6.

Усилитель обладает балансным входом ( $in+$ ,  $in-$ ) и балансным выходом ( $out+$ ,  $out-$ ). Вход с

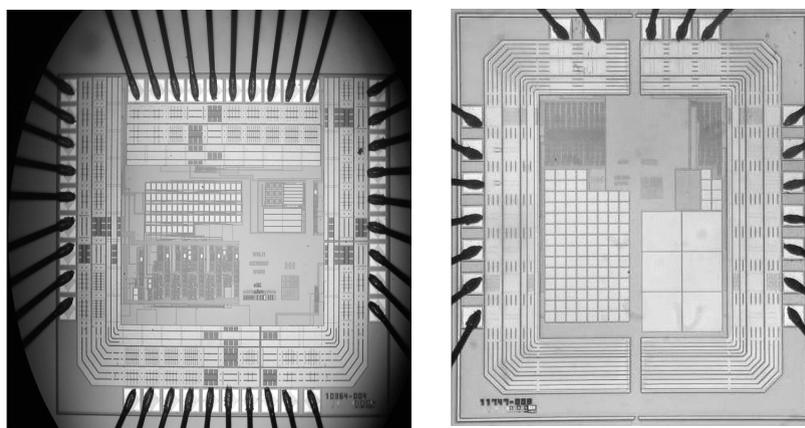


Рис. 5. Микрофотографии интегральных схем канальных ФНЧ

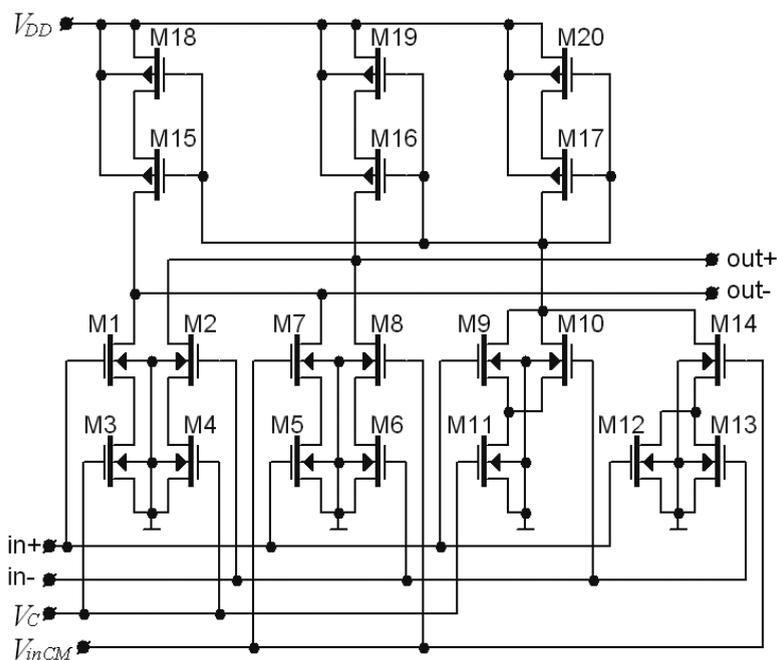


Рис. 6. Схема транскондуктивного усилителя

обозначением  $V_{inCM}$  служит для подачи напряжения смещения. Автоподстройка передаточной проводимости осуществляется изменением напряжения  $V_C$ . Усилитель состоит из двух основных частей и представляет собой параллельное соединение двух ТУ. Первая часть соответствует ТУ на транзисторах M1-M4. Входные транзисторы M1 и M2 работают в режиме насыщения, а транзисторы M3 и M4 – в триодном (линейном) режиме. При этом третья гармоника выходного тока такого ТУ имеет отрицательный знак. Вторая часть схемы представляет собой ТУ на транзисторах M5-M8. Причем входные транзисторы M5 и M6 работают в триодном режиме, а транзисторы M3 и M4 – в режиме насыщения. Третья гармоника выходного тока при этом включении транзисторов является положительной. Параллельное соединение описанных схем ТУ в силу различия знаков третьей гармоники выходного тока приводит к компенсации гармоники и, следовательно, к уменьшению уровня нелинейных искажений в усилителе. Режим ТУ по постоянному току обеспечивается токовым зеркалом на транзисторах M15-M20. Транзисторы M9-M14 выполняют функцию обратной связи по синфазной составляющей входного сигнала и обеспечивают опорный ток для токового зеркала. Транзисторы M9, M10 и M14 работают в режиме насыщения, а M11-M13 – в триодном режиме. Усилитель выполнен по КМОП-технологии

с разрешением 350 нм и обеспечивает при однополярном питании  $V_{DD} = +2,5$  В следующие параметры: номинальную передаточную проводимость  $G_m = 68$  мкА/В при напряжении смещения  $V_{inCM} = 1,25$  В и номинальном напряжении автоподстройки  $V_C = 1,5$  В. Оценка уровня шумов ТУ показывает, что спектральная плотность средней мощности шума, приведенная ко входу усилителя, составляет менее 1 мкВ<sup>2</sup>/Гц. Уровень третьей гармоники не превышает -52 дБ при амплитуде входного сигнала 0,5 В на частоте 1 МГц.

#### 4. Аналого-цифровые преобразователи

В приемниках систем связи широкое применение находят АЦП следящего типа на основе дельта-сигма модуляторов. АЦП данного типа обладают низкой потребляемой мощностью при высоком разрешении, которое в зависимости от диапазона рабочих частот может составлять от восьми до шестнадцати разрядов. В основу работы дельта-сигма АЦП заложен принцип дельта модуляции, который представляет метод тактируемого следящего преобразования непрерывного сигнала в последовательность импульсов с напряжением высокого и низкого уровней, отображающих в моменты тактирования знак приращения преобразуемого сигнала относительно предыдущего значения. Для обработки сигнала, обладающего равномерным спектром или содержащего посто-

янную составляющую, используют дельта-сигма модулятор [17–19]. Поскольку дельта-сигма модулятор осуществляет преобразование входного сигнала с частотой, существенно превышающей частоту Найквиста, то в дельта-сигма АЦП присутствует «передискретизация», что требует использования децимирующего фильтра на выходе модулятора. Свойства дельта-сигма АЦП главным образом определяются характеристиками дельта-сигма модулятора, т. к. преобразование аналогового сигнала в цифровой вид осуществляется именно в модуляторе, а децимирующий фильтр осуществляет понижение частоты следования импульсов выходного сигнала модулятора и преобразование последовательного кода в параллельный.

Разработаны схемы дельта-сигма модуляторов и децимирующих фильтров. Микросхема дельта-сигма модулятора реализована по КМОП-технологии компании UMC с разрешением 180 нм по программе EUROPRACTICE. Микрофотография кристалла показана на рис. 7. По результатам эксперимента динамический диапазон модулятора составил 56 дБ, что обеспечивает АЦП разрешающую способность 9 двоичных разрядов при тактовой частоте 50 МГц. Потребляемая мощность микросхемы составляет 33 мВт. Простейший децимирующий фильтр представляет последовательное соединение ФНЧ и дециматора. При этом тактовая частота ФНЧ равна тактовой частоте модулятора. Высокая тактовая частота фильтра приводит к росту потребляемой

мощности. Для снижения потребляемой мощности предлагается пошаговая децимация [20]. На первом шаге используется относительно простой фильтр, который обеспечивает заданное подавление только на определенных интервалах частот и осуществляется децимация на промежуточную частоту дискретизации. На втором шаге осуществляется подавление до требуемого уровня и децимация до заданного значения частоты дискретизации. Применение пошаговой децимации позволяет уменьшить потребляемую мощность, поскольку на высокой тактовой частоте работает фильтр низкого порядка, а тактовая частота второго фильтра существенно ниже. Разработан децимирующий фильтр по параметрам КМОП-технологии компании UMC с разрешением 180 нм. Полоса пропускания фильтра составила 1 МГц, подавление – более 60 дБ. Динамический диапазон фильтра составил 58 дБ, что соответствует динамическому диапазону АЦП с разрешением 10 разрядов. Проведенные оценки показали, что потребляемая фильтром мощность составляет 4 мВт.

Нанoeлектронная компонентная база является одной из приоритетных составляющих высокотехнологичной модели развития отечественной экономики, поскольку представляет основу развития практически всех областей электроники. Достижимые параметры радиотехнических, телекоммуникационных, навигационных, вычисли-

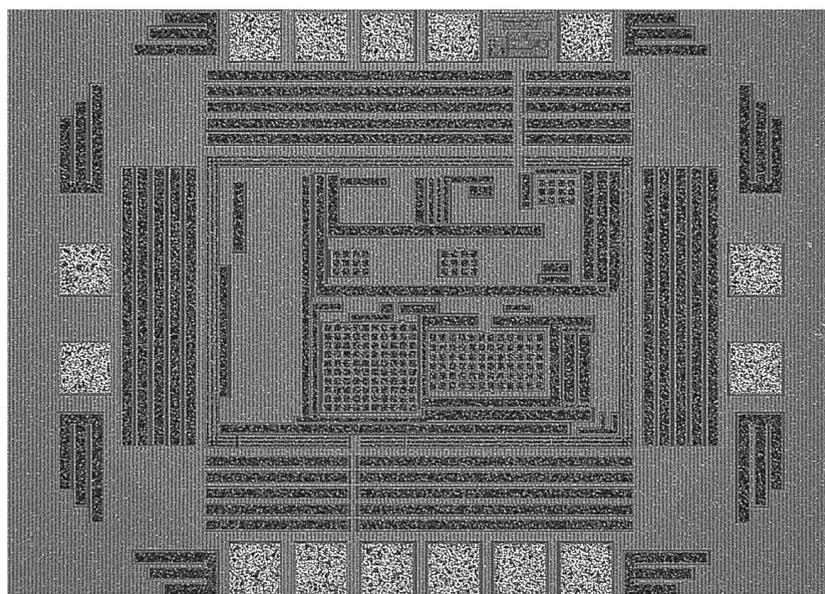


Рис. 7. Микрофотография интегральной схемы дельта-сигма модулятора АЦП

тельных систем определяются характеристиками компонентной базы. Решение проблемы импортозамещения зависит не только от технологической базы отечественной промышленности, но и, во многом, от качественного уровня схемотехники разрабатываемых компонентов. Рассмотренные в статье решения по совокупности характеристик не уступают зарубежным аналогам. При этом, в целом, интегральные схемы ориентированы

на применение в системах беспроводной связи (радиоприемных устройствах) и, как следствие, отличаются малой потребляемой мощностью. Представленные устройства нанoeлектронной компонентной базы также могут использоваться при построении систем иных типов, причем без принципиальной переработки.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Moore, G.E.** Cramming more components onto integrated circuits [Текст]/G.E. Moore//Electronics. –Apr. 19, 1965.–P. 114–117.
2. The technical impact of Moore's law [Текст]/IEEE Solid-States Circuits Society Newsletter.–Sept, 2006.–Vol.20.
3. **Коротков, А.С.** Интегральные (микроэлектронные) радиоприемные устройства систем связи – обзор [Текст]/А.С. Коротков//Микроэлектроника.–2006.–Т. 35.–№ 4.–С.321–341.
4. **Коротков, А.С.** Многофункциональные микроэлектронные радиоприемные устройства [Текст]/А.С. Коротков//Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника.–2007.–№6.–С. 15–30.
5. **Балашов, Е.В.** Микроэлектронные малошумящие КМОП-усилители радиочастотного диапазона: применение, схемотехника, тенденции развития [Текст]/Е.В. Балашов, А.С. Коротков//Зарубежная радиоэлектроника.–2007.–№ 2.–С. 3–34.
6. **Балашов, Е.В.** Сопоставительный анализ широкополосных малошумящих КМОП усилителей радиочастотного диапазона [Текст]/Е.В. Балашов//Микроэлектроника.–2008.–Т. 37.–№4.–С. 300–314.
7. **Балашов, Е.В.** Высокочастотный малошумящий КМОП-усилитель [Текст]/Е.В. Балашов, А.С. Коротков//Сб. тр. Всерос. науч.-технич. конф. Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС-2010).–Ин-т проблем проектирования в микроэлектронике РАН.–4–8 окт. 2010.
8. **Коротков, А.С.** Двойной балансный МОП смеситель в приемниках систем связи [Текст]/А.С. Коротков, А.М. Беляков//Тр. СПбГТУ №507: Радиофизика, электроника, информационные технологии.–2008.–С. 62–87.
9. **Куркин, А.А.** Моделирование синтезатора частот с целочисленным коэффициентом деления [Текст]/А.А. Куркин, А.С. Коротков//Тр. науч.-техн. семинара Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания.–Ярославский гос. ун-т.–1–3 июля 2008.–С. 74–76.
10. **Коротков, А.С.** Аналоговые и дискретные микроэлектронные фильтры для телекоммуникационных систем [Текст]/А.С. Коротков, Д.В. Морозов //Радио-
- техника.–2003.–№ 4.–С. 52–58.
11. **Коротков, А.С.** КМОП фильтр с малым потреблением мощности на переключаемых конденсаторах на основе токовых конвейеров [Текст]/А.С. Коротков, Д.В. Морозов, А.А. Тутышкин//Микроэлектроника.–2006.–Т. 35.–№ 5.–С. 406–415.
12. **Korotkov, A.S.** A 2.5-V, 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS transconductance-capacitor filter with enhanced linearity [Текст]/A.S. Korotkov, D.V. Morozov, H. Hauer [et al.]//Proc. Midwest Symp. on Circuits and Systems. –Tulsa, USA.–Aug. 2002.–Vol. 3.–P. 141–144.
13. **Korotkov, A.S.** Low-voltage continuous-time filter based on a CMOS transconductor with enhanced linearity [Текст]/A.S. Korotkov, D.V. Morozov, R. Unbehauen//J. Electronics and Communications (AEÜ).–2002.–Vol. 56.–№ 6.–P. 416–420.
14. **Коротков, А.С.** Схемотехника современных интегральных усилителей [Текст]/А.С. Коротков, Д.В. Морозов//Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника.–1998.–№ 6. С. 41–75.
15. **Morozov, D.V.** A Realization of Low-Distortion CMOS transconductance amplifier [Текст]/D.V. Morozov, A.S. Korotkov//IEEE Trans. Circuits and Systems, I. –2001.–Vol. 48.–№ 9.–P. 1138–1141.
16. **Morozov, D.V.** Transconductance Amplifier With Low-Power Consumption [Текст]/D.V. Morozov, A.S. Korotkov//IEEE Trans. Circuits and Systems, II. –2005.–Vol. 48.–№ 11.–P. 776–779.
17. **Коротков, А.С.** Аналого-цифровые преобразователи на основе дельта-сигма модуляторов [Текст]/А.С. Коротков, М.В. Теленков//Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника.–2002.–№ 12.–С. 53–72.
18. **Коротков, А.С.** Моделирование Дельта-Сигма модуляторов на переключаемых конденсаторах с учетом линейных и нелинейных свойств элементов [Текст]/А.С. Коротков, М.В. Теленков//Микроэлектроника.–2007.–Т. 36.–№ 1.–С. 66–77.
19. **Коротков, А.С.** Дельта-сигма модулятор с частотой дискретизации 50 МГц на основе 0,18 мкм КМОП-технологии [Текст]/А.С. Коротков, М.М. Пилипко, Д.В. Морозов [и др.]//Микроэлектроника.–2010.–Т. 39.–№ 3.–С. 230–240.

20. Уткин, М.Н. Синтез децимирующего фильтра дельта-сигма аналого-цифрового преобразователя с малой потребляемой мощностью [Текст]/ М.Н. Уткин,

А.С. Коротков//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление.–2009.–№ 4(82).–2009.–С. 91–97.

УДК 538.956

*Н.С. Пщелко, С.Д. Ханин, С.А. Немов*

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР ОКСИДНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

Временная стабильность свойств и соответственно надежность оксидных конденсаторов в большой степени определяются кинетикой процессов старения диэлектрика, имеющих характер роста кристаллов оксида металла, замещающих аморфную в исходном состоянии пленку [3, 4]. Это указывает на необходимость исследования в следующих направлениях:

установление информативных электрофизических параметров и характеристик для выявления фазовой и структурной неоднородности диэлектрических пленок на металле;

изыскание параметров и характеристик, информативных для прогнозирования временной стабильности эксплуатационных свойств оксидных конденсаторов, и разработка методик отбраковки потенциально ненадежных образцов на стадии изготовления;

изыскание возможностей повышения временной стабильности свойств металлодиэлектрических структур посредством направленных изменений их состава и строения.

В настоящей статье представлены результаты исследований структурно-чувствительных свойств металлооксидных диэлектрических пленок, раскрывающие возможности решения указанных задач.

Задача выявления в оксидных солях фазовой неоднородности типа кристаллов оксида металла решалась на основе результатов исследования влияния кристалличности на электронную проводимость диэлектрика как параметра, обладающего наибольшей структурной чувствительностью.

Эксперименты проводились на модельных плоских образцах тантала и ниобия, анодирован-

ных при напряжении 100, 150 и 250 В и подвергнутых электрическому старению в контакте с однопроцентным водным раствором  $H_2SO_4$  при напряжении, равном  $0,85 U_a$  ( $U_a$  – напряжение анодирования) и температуре  $T = 358$  К. Изменение длительности электротеплового нагружения позволяло, с учетом известных кинетических закономерностей процесса электростимулированного роста кристаллов, получить оксидные слои с заданной степенью кристалличности. Последняя контролировалась с помощью оптической микроскопии.

Эксперимент обнаружил сильное возрастание электронной проводимости оксидного диэлектрика при образовании кристаллов. В этой связи в первую очередь представлялось необходимым определить, чем обусловлено возрастание проводимости: повышенной проводимостью по границам раздела кристалл–аморфное вещество, или различием проводимостей аморфной и кристаллической фаз оксида, и, в последнем случае, найти соотношение этих проводимостей.

С этой целью изучалось распределение тока по площади поверхности оксидного слоя. В результате было установлено следующее. Распределение величин локальной плотности тока по площади кристаллической области оксида со старенной пленки не слишком широко и сдвинуто относительно распределения локальных токов по площади аморфной области в сторону больших токов на 2-3 порядка величины, причем никакой существенной локализации тока на межфазовых границах раздела аморфный оксид–кристаллический оксид не происходит.

Из сказанного вытекает, что при анализе токопрохождения через аморфно-кристаллическую оксидную пленку, к ней следует подходить как к

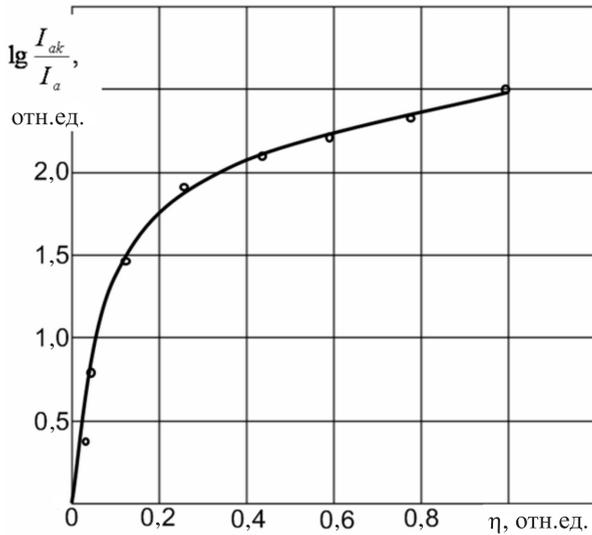


Рис. 1. Зависимость отношения плотности тока, протекающего через конденсаторную структуру Ta – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – электролит к плотности тока, протекающего через аморфный оксид тантала, от концентрации кристаллической фазы  
Точки – данные эксперимента; сплошной линией обозначена расчетная зависимость

двухфазной системе, учитывая значительно большую проводимость кристаллической фазы, по сравнению с аморфной.

На рис. 1 точками представлены результаты измерений тока, протекающего через конденсаторную структуру Ta–Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–электролит (38-процентный водный раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) в зависимости от степени кристалличности оксидной пленки.

Там же сплошной линией изображен график концентрационной зависимости плотности тока, рассчитанной в приближении модели параллельного включения сопротивлений аморфной и кристаллической фаз, с учетом их проводимостей, по формуле:

$$I_{ak} = I_a[(A - 1)\eta + 1], \quad (1)$$

где  $I_a$  – плотность тока, протекающего в конденсаторной структуре с аморфным диэлектриком;

$A = \frac{I_k}{I_a}$  – отношение плотности тока, протекающего через кристаллическую область, к плотности тока, протекающего через аморфную область диэлектрика.

Из рис. 1 видно, что концентрационная зависимость проводимости аморфно-кристаллической пленки хорошо описывается в рамках параллель-

ного включения сопротивления двух фаз, т. е. формулой (1).

Пользуясь этой моделью, можно по результатам токовых измерений определять степень кристалличности оксидной пленки, причем наиболее точно – в интересной для технологии области малой кристалличности, где рассматриваемая зависимость сильна.

При этом, однако, необходимо учитывать, что величина  $A$  зависит от условий измерения тока. Так, для тока, измеренного по стандартной для контроля оксидных конденсаторов методике, через минуту после приложения напряжения, величина  $A$  значительно меньше, чем для стационарного тока (это связано с меньшей продолжительностью релаксации тока в кристаллическом оксиде по сравнению с аморфным). Кроме того, как далее будет показано, значение  $A$  зависит от величины напряжения, приложенного к конденсаторной структуре.

Проведенный в статье анализ зависимости проводимости кристаллического оксида от напряженности электрического поля (напряжения) открывает возможность повышения чувствительности токовых измерений. Как видно из рис. 2, эта зависимость качественно отличается от зависимости проводимости как функции напряженности электрического поля для аморфного металлоксида: во всем интервале электрических полей проводимость кристаллического оксида возрас-

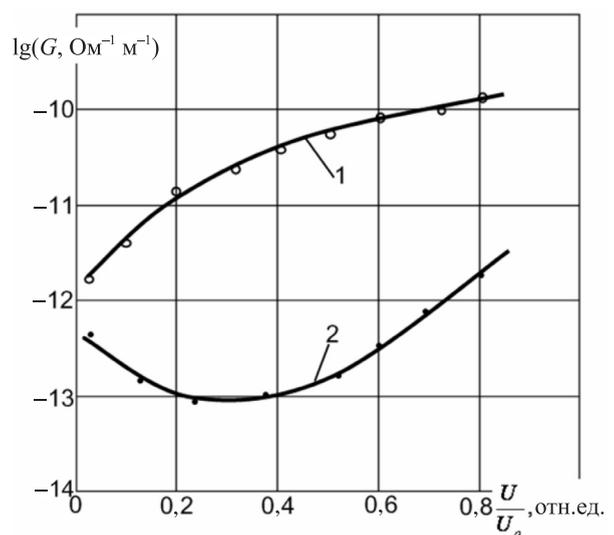


Рис. 2. Зависимости проводимости кристаллического оксида тантала (1) и аморфного оксида тантала (2) от напряжения, приведенного к напряжению анодирования металла

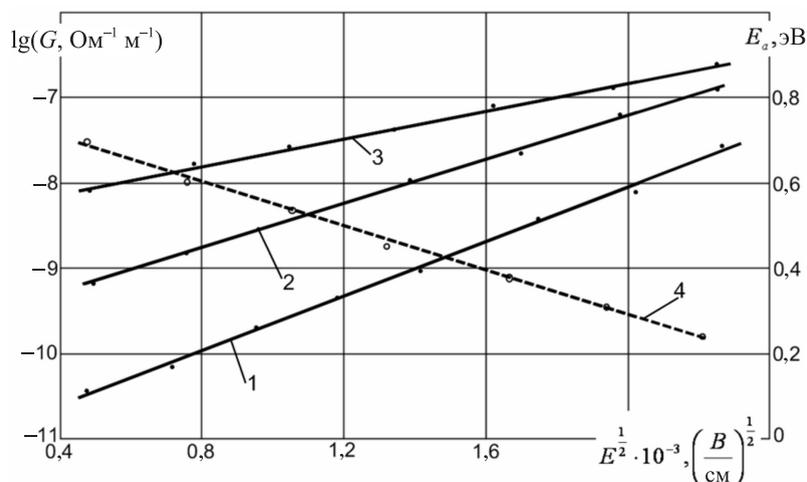


Рис. 3. Линейаризация зависимости проводимости кристаллического оксида тантала от напряженности электрического поля при температурах 303 К (1); 333 К (2); 363 К (3)  
4 – зависимость энергии активации электропроводности кристаллического оксида тантала от напряженности электрического поля

тает с увеличением напряженности поля по экспоненциальному закону.

Температурно-полевая зависимость неомической проводимости в данном случае может быть описана следующим выражением (рис. 3):

$$G_k \sim \exp\left(\frac{\beta E^2}{kT}\right). \quad (2)$$

Определяющим механизмом проводимости кристаллического металлооксида может быть, в частности, эффект Френкеля (экспериментальное значение  $\beta$  для кристаллических  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  и  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  не слишком отличается от расчетного  $\beta_\phi$ ), или перколяционная электропроводность [2]. В последнем случае теория предсказывает величину  $\beta = (ceaU_0)^{1/2}$ , где  $a$  и  $U_0$  – пространственный и энергетический масштабы флуктуаций потенциала соответственно;  $c$  – численный коэффициент;  $e$  – заряд электрона.

Заметим, что для образования в поликристаллических слоях металлооксида типа  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  крупномасштабных флуктуаций потенциала существуют, по крайней мере, две предпосылки: протяженность дефектов микроструктуры, обусловленных отклонением состава оксида от стехиометрического, и наличие границ раздела между отдельными кристаллами. Проведенные эксперименты обнаружили увеличение  $\beta$  (формула (2)) при восстановительной термообработке оксидного слоя, что качественно согласуется

с предполагаемым увеличением масштаба флуктуаций потенциала.

На основании изложенных результатов по неомической электропроводности можно сделать следующий вывод. Измерять ток целесообразно при напряжении, составляющем 0,3–0,4 от напряжения анодирования (0,5 от номинального напряжения  $U_{\text{ном}}$  оксидно-электролитических конденсаторов), т. к. именно при этих условиях величина  $A$  максимальна (рис. 4).

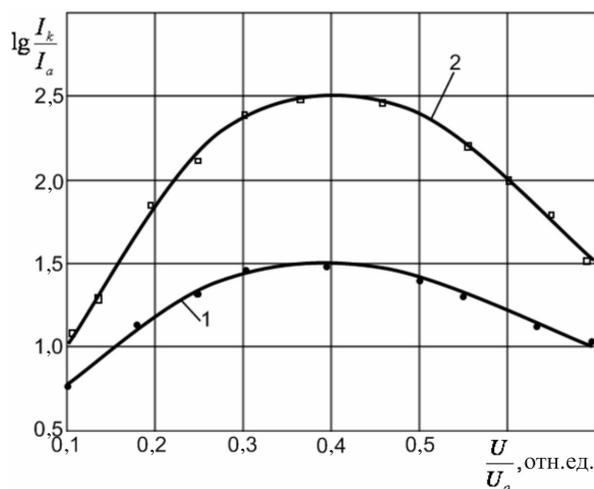


Рис. 4. Зависимость величины  $A = \frac{I_k}{I_a}$  отношения плотности тока, протекающего через кристаллическую область, к плотности тока, протекающего через аморфную область диэлектрика, для оксидов тантала (1) и ниобия (2) от напряжения, приведенного к напряжению анодирования металла

Информативность предлагаемого способа обнаружения фазовой неоднородности оксидного конденсаторного диэлектрика иллюстрирует следующий пример. Анализировались две партии танталовых объемно-пористых анодов с различным содержанием углерода на поверхности, анодированных при напряжении 180 В. Измерения тока утечки по стандартной методике ( $U = 0,7U_a = 125$  В) не позволили различить образцы двух партий. Измерения же величины тока при  $U = 0,35U_a$  обнаружили, что величины тока у образцов с повышенным содержанием углерода в 8–14 раз выше, чем у образцов другой партии. Микроскопическое обследование поверхности оксидного диэлектрика анодов обнаружило в оксидном слое образцов с повышенным содержанием углерода кристаллическую фазу металлооксида в количестве единиц процентов. В результате у таких образцов наблюдается быстрое электрическое старение анодов в конденсаторной системе – прогрессирующий рост кристаллов оксида металла.

Перейдем к решению второй из указанных выше задач. Посредством изотопных исследований (с применением изотопа кислорода  $O^{18}$  в составе водного растворителя формовочного и рабочего электролитов) установлено, что рост кристаллов обусловлен реакционной электродиффузией частиц окислителя к поверхности базового металла [3]. Показано, что кинетика процесса электростимулированного роста кристаллов в большой степени определяется отклонением состава оксида от стехиометрического в приле-

гающем к металлу слое, примесным составом и структурой поверхности базового металла.

При наличии крупномасштабных структурных неоднородностей оксидный диэлектрик становится неоднородным по проводимости. В этой связи можно ожидать, что поставленная задача индивидуального прогнозирования надежности оксидных конденсаторов может быть решена с помощью методов инфразвуковой диэлектрической спектроскопии. Выбор диапазона частот обусловлен медленностью релаксационных процессов в материалах с низкой подвижностью носителей заряда. Методика измерения малых токов, электрических потенциалов и больших сопротивлений в постоянном электростатическом поле была разработана нами, в частности, в [1].

Неоднородный по проводимости диэлектрик обладает экстремальной частотной зависимостью  $\text{tg}\delta$ , качественно отличной от монотонной зависимости  $\text{tg}\delta(f)$  однородного аморфного оксида. Кроме того, в случае, если структурные дефекты в оксиде создают центры захвата носителей заряда, это должно проявляться в падении величины  $\text{tg}\delta$  при приложении к диэлектрику сильного постоянного электрического поля [2–4].

С целью экспериментальной проверки информативности предлагаемых методик была сформирована выборка образцов оксидированного тантала, изготовленных по различным технологиям, вносящим в структуру оксидного диэлектрика дефекты определенного типа. Варьировали температуру анодирования и длительность реоксидирования в режиме термоударной формовки.

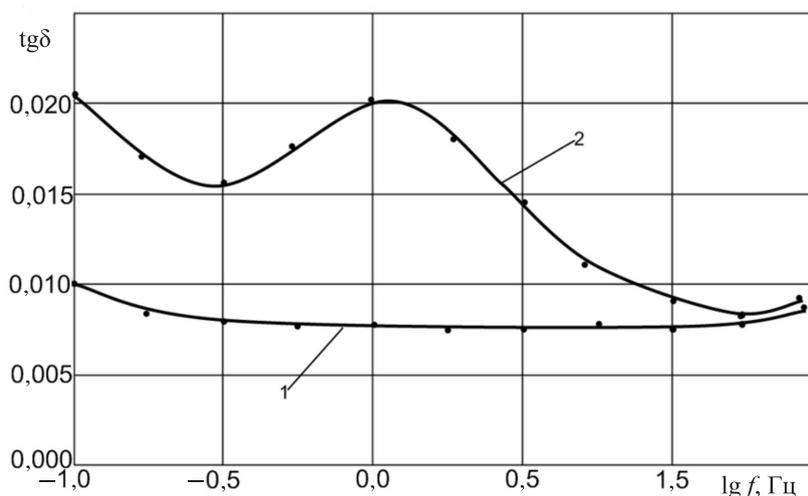


Рис. 5. Характерные частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь оксида тантала: 1 – нормальная (для основной массы образцов); 2 – аномальная

Кроме того, в обучающую выборку вводились образцы с повышенным содержанием углерода на поверхности металла. Эти технологические приемы могут приводить к ускорению процесса электрического разрушения оксида.

Стандартные параметры у всех образцов были практически одинаковы. Наряду со стандартными параметрами измерялась частотная зависимость  $\text{tg}\delta$  в интервале частот 0,01–10 Гц без постоянного смещения и с приложением напряжения постоянного тока. Величина напряжения, прикладываемого к электродам конденсаторной металлодиэлектрической структуры, соответствовала минимуму статической проводимости.

В результате измерений у ряда (из числа изготовленных при повышенной температуре, малом времени реоксидирования и загрязнении поверхности анода углеродом) образцов были обнаружены ожидаемые аномалии – максимум в частотной зависимости  $\text{tg}\delta$  вблизи 1 Гц (рис. 5) и сильное (до полутора порядков величины) уменьшение  $\text{tg}\delta$  на фиксированной частоте в инфразвуковой области при приложении к диэлектрику постоянного электрического поля.

Результаты последующих долговременных испытаний оксидно-электролитических конденсаторов под электротепловой нагрузкой показали, что образцы, обладающие на стадии изготовления аномальными низкочастотными свойствами, обнаруживают тенденцию к увеличению тока утечки со временем (рис. 6), что обусловлено электростимулированным ростом кристаллов металлооксида на поверхности анода.

Опыт применения инфразвуковой диэлектрической спектроскопии для аттестации танталовых оксидно-электролитических конденсаторов подтвердил целесообразность применения данных методик для отбраковки потенциально ненадежных образцов. При реализации предлагаемого способа в условиях производства конденсаторов измерения стационарного тока могут быть совмещены с операцией термоэлектротренировки, что позволяет сократить время, необходимое для оценки качества изделия.

Остановимся, наконец, на возможностях повышения временной стабильности металлодиэлектрических структур оксидных конденсаторов. Исходя из установленного механизма роста кристаллов посредством реакционной электро-

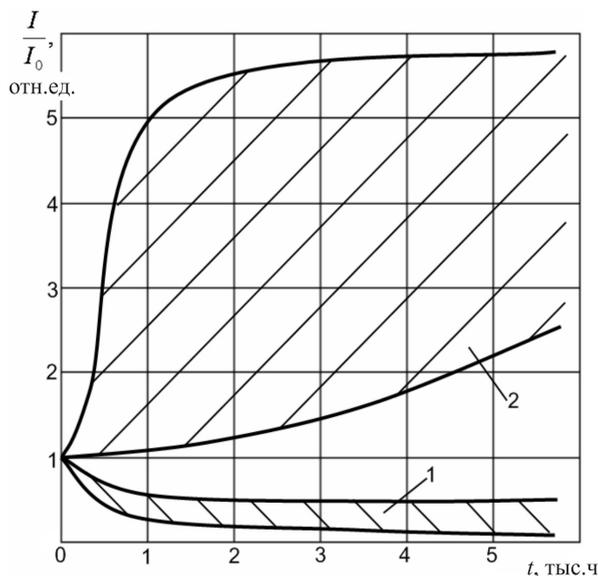


Рис. 6. Поля изменения тока утечки танталовых оксидно-электролитических конденсаторов в процессе испытаний:

- 1 – конденсаторы с нормальными низкочастотными характеристиками на стадии изготовления;
- 2 – конденсаторы с аномальными характеристиками

диффузии кислородосодержащих ионов к поверхности базового металла, для повышения качества металлооксидных конденсаторов целесообразными представляются следующие мероприятия:

приближение состава аморфного оксида металла к стехиометрическому посредством использования формовочных электролитов с добавками сильных окислителей;

гомогенизация микроструктуры оксидного слоя посредством его термической обработки в соответствующих режимах;

создание на межфазовой границе раздела оксидный диэлектрик–металл барьера для проникновения кислорода посредством легирования оксида анионами фтора.

снижение реакционной способности металла и диффузионной подвижности в нем кислорода посредством легирования металла молибденом и вольфрамом.

Как показал эксперимент, использование описанных технологических приемов позволяет существенно повысить временную стабильность свойств металлодиэлектрических структур и, соответственно, ресурс оксидных конденсаторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пшелко, Н.С. Использование полевых транзисторов для контроля характеристик диэлектриков [Текст]/Н.С. Пшелко, А.С. Мустафаев//Записки Горного института.–2010.–№ 187.–С.125–131.

2. Ханин, С.Д. Модели прыжкового переноса и методы анализа электронных свойств неупорядоченных систем [Текст]/С.Д. Ханин//Изв. РГПУ им. А.И. Герцена. Сер. Естественные и точные науки.–2002.–№ 2(4).–С. 47–56.

3. Ханин, С.Д. Проблемы электрофизики металлооксидных конденсаторных диэлектриков. [Текст]/С.Д. Ханин//Обзоры по электронной технике. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты.–1990.–Вып. 1 (1524).–57 с.

4. Khanin, S.D. Structure inhomogeneities of the oxide dielectric and the properties of tantalum capacitors [Текст]/S.D. Khanin//Mater. Science Forum Passivation of metals and semiconductors. –Germany, Clausthal.–1995. –Vol. 185–188.–P. 573–580.

УДК 512.942 + 539.12; 539.21; 530.15(043.5)

*А. Эбанга, В.И. Тарханов*

## УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ФЕРРИТОВЫХ КОЛЕЦ С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ КАТУШЕК

Кольцевые ферритовые сердечники широко используются в радиотехнике для обеспечения сильной магнитной связи между электрическими цепями [1]. Большая магнитная проницаемость и замкнутость магнитного потока позволяют создавать компактные трансформаторы, фильтры и другие элементы связи. В области высоких частот катушки таких элементов содержат малое число витков, что делает их простыми в изготовлении. Вместе с тем, сильная магнитная связь между электрическими цепями не всегда желательна и ее можно легко минимизировать. Цель работы состоит в том, чтобы показать, как, меняя форму или способ намотки катушек на ферритовое кольцо, можно существенно изменять характеристики самих элементов связи и свойства устройств, в составе которых они используются.

В статье рассматриваются два характерных примера катушек с измененной геометрией: градиентные катушки и катушки широкополосных трансформаторов [1]. Первый тип катушек представляет собой катушку, две одинаковые секции которой наматываются на диаметрально противоположных частях ферритового кольца в противоположном направлении. Это приводит к нарушению однородности магнитного потока в объеме кольцевого сердечника и к появлению двух узлов магнитного потока между указанными секциями. Размещение второй аналогичной катушки в узлах

магнитного потока первой приводит к минимизации магнитной связи между ними.

Такая конструкция из скрещенных градиентных катушек на общем кольцевом ферритовом сердечнике была использована нами в двух различных целях.

Первое применение она нашла при создании полосового фильтра для усилителя приемного тракта импульсного спектрометра ЯМР, предназначенного для работы с образцами литиевого феррита. Усилитель должен был обеспечивать усиление 40 дБ в полосе пропускания шириной в несколько мегагерц с центром около 70 МГц, а также обладать временем восстановления чувствительности менее 1 мкс.

Для сокращения времени восстановления чувствительности связь между каскадами усилителя была выбрана индуктивной [2]. Это исключало процесс перезаряда разделительных конденсаторов, характеризующийся большой постоянной времени. Чтобы расширить полосу пропускания до нескольких мегагерц, катушки индуктивной связи, которые представляли собой скрещенные градиентные катушки, намотанные на общем кольцевом ферритовом сердечнике К8х4х2 марки УВ-146, были введены в состав полосового фильтра с расстроенными контурами. Каждая секция градиентной катушки содержала по четыре витка провода ПЭВ-0,2, что облегчало ее локализацию

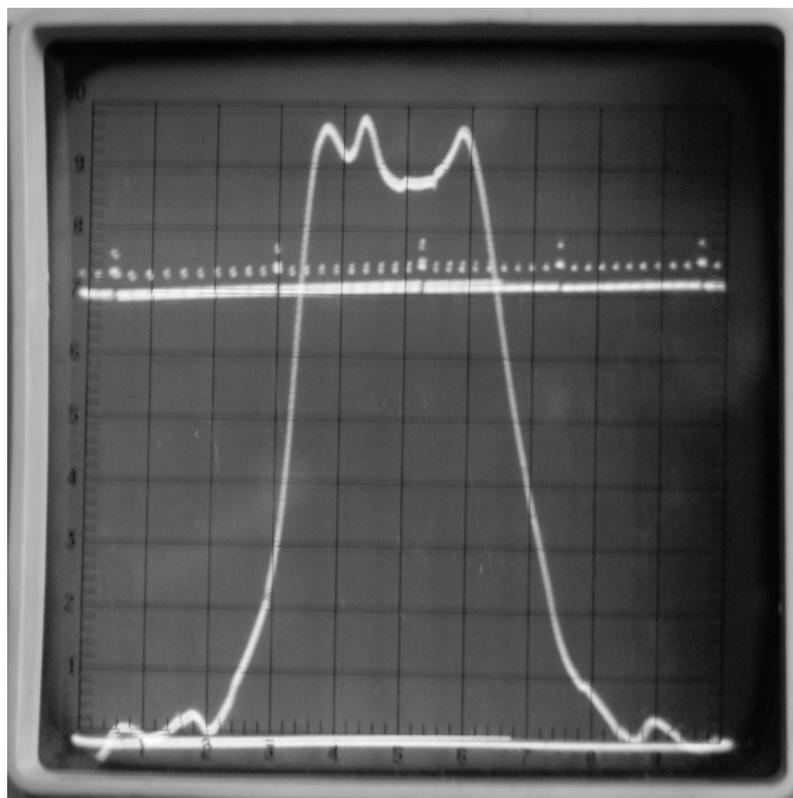


Рис. 1. Амплитудно частотная характеристика двухкаскадного усилителя на экране прибора Х1-42. По горизонтали отложена частота, по вертикали – нормированный на 1 коэффициент пропускания усилителя. Измерительная линия, выставленная по уровню 0,707, имеет одиночные метки через 1 МГц и двоянные метки через 10 МГц. Центральная двоянная метка соответствует частоте 70 МГц

на поверхности ферритового кольца. Ширина полосы пропускания задавалась величиной расстройки контуров полосового фильтра, которая регулировалась с помощью подстроечных конденсаторов, П-образная форма характеристики полосы пропускания усилителя достигалась за счет тонкой регулировки величины взаимной индуктивности катушек путем смещения секций одной градиентной катушки относительно узлов магнитного потока другой. Результат настройки контролировался по экрану измерителя амплитудно-частотных характеристик Х1-42. Оптимальное расположение секций на кольце фиксировалось клеем.

Пример амплитудно-частотной характеристики приемного тракта спектрометра с коэффициентом усиления 40 дБ и полосой пропускания 62–75 МГц по уровню 0,707 представлен на рис. 1. Время восстановления усилителя составило менее 0,2 мкс, что подтверждалось устойчивым наблюдением сигналов короткоживущего эха со временем поперечной релаксации  $T_2 = 1$  мкс [2].

Время восстановления аналогичного усилителя с емкостной связью между каскадами составляло более 5 мкс.

В данном случае структурирование магнитных потоков в ферритовом кольце с помощью градиентных катушек позволило создать регулируемый элемент полосового фильтра с тонкой подстройкой величины взаимной индуктивности его катушек.

Другое применение этой же конструкции, но уже на кольце из обогащенного до 80 % изотопом  $^{57}\text{Fe}$  литиевого феррита, используемого в качестве рабочего вещества спинового эхо-процессора [3], позволило повысить эффективность режимов работы этого устройства функциональной электроники. Необходимость такого шага объясняется тем, что время продольной релаксации  $T_1$  для ядер  $^{57}\text{Fe}$  в таком образце достигает 8 мс. Это значит, что время восстановления равновесного состояния в каждом цикле работы эхо-процессора составляет от 24 до 40 мс. Для увеличения частоты повторения рабочих циклов необходимо либо ис-

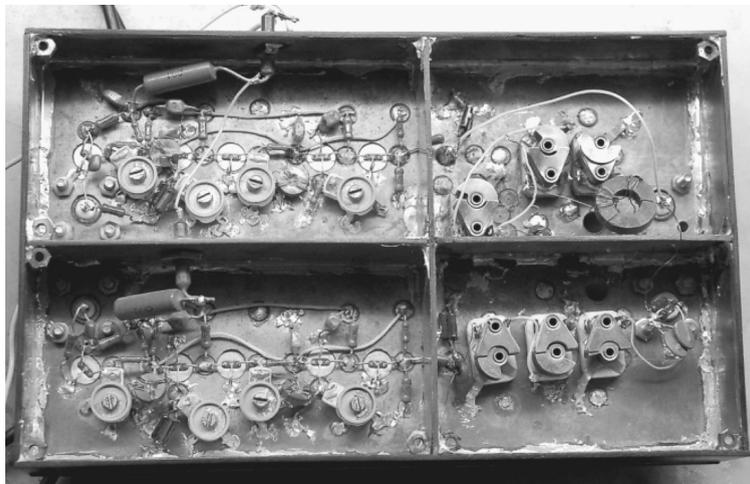


Рис. 2. Макет двухканального эхо-процессора на одном образце литиевого феррита

пользовать еще один образец, либо найти способ возбуждения данного образца, при котором он может работать в двух независимых каналах эхо-процессора. Для реализации именно такого способа возбуждения и была применена комбинация из двух взаимно перпендикулярных градиентных катушек.

Возможность такого подхода обусловлена тем, что литиевый феррит имеет поликристаллическую многодоменную структуру, в которой все пространственные ориентации внутрикристаллического магнитного поля на ядрах равновероятны. В формировании эхо-сигналов принимают участие преимущественно ядра, расположенные в 180-градусных доменных границах, ширина которых достигает 1000 постоянных решетки. Для них коэффициент усиления при переносе внешнего радиочастотного поля на ядра составляет порядка  $10^5$ . В этих условиях единственным выделенным направлением в пространстве оказывается ось катушки возбуждения, задающая направление линейной поляризации радиочастотного магнитного поля. Эхо-сигналы формируются с линейной поляризацией в направлении возбуждения. Поэтому для возбуждения и регистрации эхо-сигналов используют одну и ту же катушку [3].

Эксперимент проводился на макете, содержащем два идентичных приемных тракта, описанных выше, и две электродинамические системы в виде П-образных резонансных контуров. Внешний вид макета представлен на рис. 2.

Результат независимого возбуждения структурируемых градиентными катушками частей кольцевого образца представлен на рис. 3.

Нижний канал эхо-процессора возбуждается первыми двумя радиоимпульсами. Эхо-сигнал появляется только в этом канале. Второй канал в формировании эхо-сигнала практически не участвует. Верхний канал эхо-процессора возбуждается двумя радиоимпульсами сразу после наблюдения эхо-сигнала в нижнем канале. Сигнал первичного эха формируется только в этом канале. Различие в амплитудах эхо-сигналов объясняется различием в амплитудах возбуждающих радиоимпульсов. Для верхнего канала они были на 20 дБ слабее.

Полученный результат показывает, что если одновременное возбуждение обоих каналов явля-

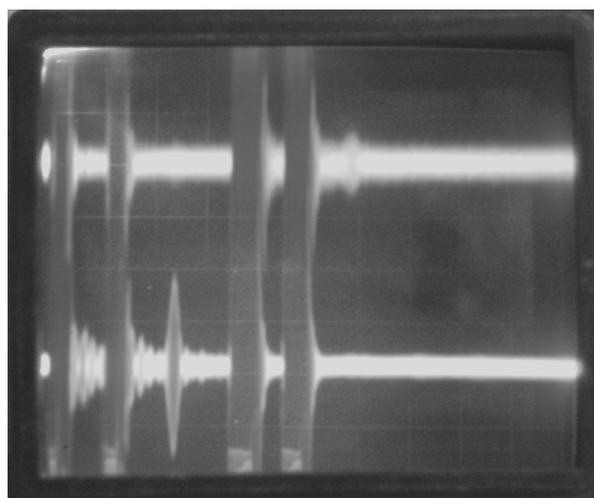


Рис. 3. Последовательное возбуждение двух каналов эхо-процессора на экране двухканального осциллографа С1-99

Развертка по горизонтали 1 мкс/дел,  
чувствительность по вертикали 100 мкВ/дел

ется проблематичным, поскольку возбуждающие импульсы одного канала могут мешать наблюдению эхо-сигналов во втором, то поочередное их возбуждение позволяет, во-первых, сократить в два раза требуемое время восстановления равновесной намагниченности, а, во-вторых, обеспечить чередование разнородных операций обработки. Это дает возможность, например, оперативно изменять параметры согласованного фильтра [3], чередуя ЛЧМ сигнал с ФКМ сигналом в разных каналах эхо-процессора. При ширине линии ЯМР 2 МГц и времени поперечной релаксации  $T_2 = 2$  мс максимальная база обрабатываемого сигнала составляет 2000, что представляет несомненный интерес в области радиолокации. Недостатком описанной конструкции является снижение на 3 дБ отношения сигнал-шум на выходе каждого из каналов эхо-процессора по сравнению с одноканальным использованием того же образца из-за эффективного уменьшения объема рабочего вещества.

Другая разновидность катушек наматывается на кольцевом ферритовом сердечнике коротким отрезком кабеля, скрученным из двух или более изолированных проводов. Такое устройство известно в радиотехнике как широкополосный трансформатор [1]. Оно обладает тремя важными свойствами: обеспечивает перенос электромагнитных сигналов между электрически изолированными цепями; имеет широкую полосу пропускания, достигающую восьми октав [1], и задает «поляризацию» вторичных обмоток подключением одного из концов первичной обмотки к «земле». Это позволяет выбирать полярность включения вторичной обмотки, а значит, и полярность возбуждаемых в ней сигналов эдс индукции, и полярность вносимых ими во вторичную цепь токов, переносящих электромагнитные сигналы. Последняя степень свободы использована нами для создания устройства кодирования, позволяющего объединять восемь физических линий связи типа «витая пара» [4] в единую систему или сеть, и устройства декодирования, позволяющего восстанавливать исходные потоки электрических сигналов из смешанных состояний.

Цифра восемь выбрана не случайно. Она соответствует размерности базиса геометрической алгебры Клиффорда  $G_{3,0}$  [3], построенной на ортах трехмерного евклидова пространства. В работах [5–7] показано, что этот базис имеет два представления: мультивекторное и аддитивное, кото-

рые связаны между собой простыми линейными соотношениями. Мы использовали эти соотношения в качестве ключа при создании кодирующего и декодирующего устройств.

Смысл кодирования заключается в таком перераспределении потоков сигналов, поступающих с независимых кабелей первичного набора, чтобы по каждому кабелю вторичного набора проходили все восемь потоков сигналов, но с различными и линейно независимыми комбинациями направлений токов, переносящих эти потоки. Это достигается за счет электрической изоляции кабелей первичного набора от кабелей вторичного набора и перераспределения потоков электрических сигналов кодирующим устройством, в состав которого входят восемь специально сконструированных широкополосных трансформаторов.

Каждый трансформатор представляет собой семь витков кабеля из скрученных вместе девяти изолированных проводников из провода ПЭВ-0,2, намотанных на кольцевом сердечнике К10х6х4 из феррита Ф-2000. Один из проводников кабеля служит первичной обмоткой трансформатора и подключается к выходу одного из кабелей первичного набора линий связи. Восемь вторичных обмоток этого трансформатора делят приходящий на первичную обмотку поток электрических сигналов на восемь равных частей и вводят их в восемь вторичных линий связи. Вторичные обмотки разных трансформаторов соединяются последовательно с соблюдением полярности, предписанной соотношениями (5) работы [7]. Такой способ коммутации аналогичен способу формирования луч-сумм в рентгеновской компьютерной томографии [8], но реализуется в отношении потоков электрических сигналов, а не их отдельных составляющих. Особенность процесса кодирования состоит в том, что только для одного из исходных потоков сигналов все восемь составляющих тока в кабелях вторичного набора оказываются одной направленности (полярности). Для каждого из семи других потоков четыре составляющих тока передаются с одной направленностью (полярностью) и четыре – с противоположной. В результате создаваемые ими магнитные поля как в окружающем пространстве взаимно гасятся (деструктивно интерферируют). Это защищает передаваемые по ним потоки сигналов от несанкционированного доступа.

Ключом для реконструкции исходных потоков электрических сигналов является переход

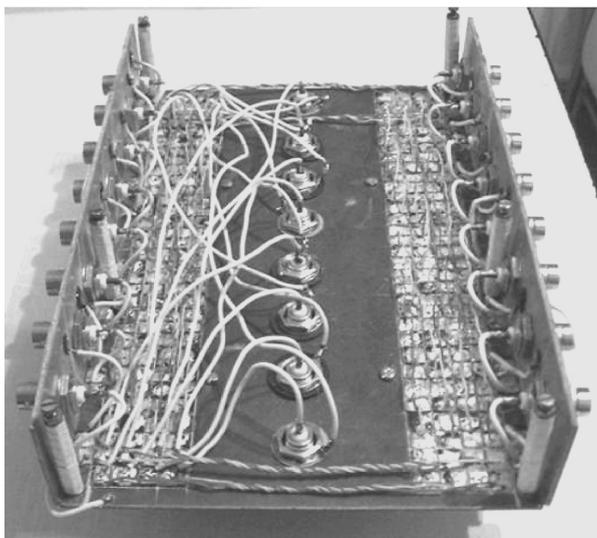


Рис. 4. Макет комбинированной линии связи для передачи данных в томографическом формате

из аддитивного базиса в мультивекторный. Для этого используется декодирующее устройство, в состав которого входит набор из восьми таких же широкополосных трансформаторов. Однако эти трансформаторы включаются в противоположном направлении. Полярность подключения вторичных обмоток каждого трансформатора к выходам кабелей вторичного набора определяется соотношениями (6) работы [7]. Порядок реконструкции потоков электрических сигналов, передаваемых по линиям первичного кабеля, произволен.

Экспериментальная проверка работоспособности кодирующего и декодирующего устройств проводилась на макете, внешний вид которого представлен на рис. 4.

Справа и слева расположены разъемы, к которым подключаются обычные линии связи типа витая пара. Один из выводов каждой такой линии соединен с землей. Центральный ряд разъемов позволяет наблюдать электрические сигналы во вторичной линии связи. Эти разъемы изолированы от земли. Ферритовые кольца широкополосных трансформаторов располагаются снизу и экранируются алюминиевой фольгой.

При правильной коммутации выводов вторичных обмоток трансформаторов поток электрических сигналов с каждой первичной линии связи слева передается по всем восьми линиям связи вторичного кабеля, но выводится только на одном из разъемов справа и наоборот. В качестве тестовых потоков сигналов использовались гар-

монические сигналы, меандры, последовательности импульсов, музыкальные мелодии с плеера, радиоприемника и из Интернета, а также сигналы, имитирующие белый шум. Для удобства они выбирались преимущественно в звуковом диапазоне частот с амплитудой порядка 100 мВ. Прохождение сигналов через комбинированную линию связи контролировалось визуально на экране осциллографа С1-99 и на слух при воспроизведении через динамик.

Результаты экспериментов показали, что передача по вторичному набору кабелей только одного потока сигналов приводит к его реконструкции только в одном из восьми широкополосных трансформаторов декодирующего устройства. На остальных выходах декодирующего устройства амплитуда выходных сигналов не превышает уровня собственного шума регистрирующего устройства, величина которого оценивается в 4 мкВ. Эти сигналы не прослушиваются и через динамик на выходе усилительного тракта акустической системы.

Аддитивное смешивание кодирующим устройством потоков гармонических, импульсных, музыкальных и шумовых сигналов, передаваемых в общем диапазоне частот, делает их труднодоступными для акустического и визуального восприятия в кабелях вторичного набора, а также для разделения стандартными методами обработки сигналов. В то же время декодирующее устройство уверенно разъединяет их на исходные потоки сигналов в реальном масштабе времени и без заметных искажений.

Интересно, что реализуемая в декодирующем устройстве разновидность конструктивной интерференции никак не связана с фазами передаваемых сигналов и со степенью их когерентности. Она определяется только однонаправленностью токов, переносящих поток сигналов во всех восьми вторичных обмотках декодирующего широкополосного трансформатора. Это позволяет говорить о новом типе бинарных операций, выполняемых широкополосным трансформатором над произвольными потоками электрических сигналов, которые реализуются на уровне базисных элементов [7].

Описанное устройство является пассивным. Оно не требует затрат энергии на выполнение описанных преобразований над потоками информационных электрических сигналов.

Устройство симметрично и допускает одновременную передачу потоков сигналов в противоположных направлениях.

Разрыв одной из линий связи внутри комбинированного кабеля не приводит к потере одного из восьми потоков сигналов. Все восемь потоков попадают к своим адресатам, однако каждый из адресатов замечает появление шумовой дорожки с амплитудой в 1/8 от амплитуды передаваемых сигналов. Это объясняется тем, что в этом случае конструктивная и деструктивная интерференция составных частей потоков реализуются не полностью. Появление шумовой дорожки не зависит от направления передачи потоков сигналов. Это обстоятельство может служить индикатором появления неисправности обобщенного канала связи или акта несанкционированного вторжения.

Описанное устройство представляет интерес для создания защищенных от внешних помех и от утечки информации фрагментов линий передачи данных длиной до 400 м с полосой пропускания до 1 ГГц. Полоса пропускания ограничивается полосой пропускания кабеля типа «витая пара». Дополнительное экранирование кабеля не требуется.

В статье описаны устройства, в основе работы которых лежит использование ферритовых колец с катушками различного типа. Показано, что

скрещенные градиентные катушки на ферритовом кольце позволяют минимизировать магнитную связь между цепями и тонко подстраивать ее величину. В случае ферритового образца эхо-процессора это обеспечивает возможность формирования двух независимых каналов обработки информации на одном образце, что способствует повышению эффективности режимов его работы. В то же время поляризационные свойства обмоток широкополосных трансформаторов позволяют создавать пассивные устройства обработки информации, выполняющие операции над потоками электрических сигналов независимо от их содержания. Рассмотрен пример таких преобразований в восьмиэлементной линии связи, приводящий к изменению образов передаваемых потоков сигналов при изменении базиса их представления. Полезным эффектом оказывается защита от несанкционированного доступа и от внешних электромагнитных помех на фрагментах линии длиной до 400 м, ограничиваемых свойствами кабеля типа «витая пара». Особого внимания заслуживает предложенный способ аддитивного смешивания пассивным кодирующим устройством произвольных потоков сигналов, включая шумовые, с последующим чистым разделением их пассивным декодирующим устройством в реальном масштабе времени. Указанные устройства не имеют аналогов среди устройств других типов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рэд, Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. Схемы, блоки, 50-омная техника [Текст]/Э. Рэд.—М.: Мир, 1990.—229 с.
2. Черемисин, С.М. Усилитель промежуточной частоты с быстрым восстановлением [Текст]/С.М. Черемисин//ПТЭ.—1976.—№ 3.—С. 118–119.
3. Тарханов, В.И. Геометрическая алгебра, ЯМР и обработка информации [Текст]/В.И. Тарханов.—СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.—214 с.
4. Горшкова, Л. Среды передачи данных [Электронный ресурс]/Л. Горшкова, Г. Ефимов, Сетевой журнал. —2000. —№ 5//<http://www.setevoi.ru/cgi-bin/text.pl/magazines/2000/5/82>
5. Ebanga, A. Additive basis for multivector information [Текст]/V.I. Tarkhanov, A. Ebanga//Proc. SPIE.—Jan. 2007.—Vol. 6594A.
6. Ebanga, A. Information in eight dimensions: structuring and processing [Текст]/A. Ebanga, V.I. Tarkhanov//Proc. SPIE.—2008.—Vol. 7006, 70060P.
7. Эбанга, А. Паравекторная логика операций на состояниях геометрического байта [Текст]/А. Эбанга, В.И. Тарханов//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление.—2008.—№ 3 (59)—С. 278–283.
8. Эбанга, А. Томографическое управление потоками информации в многомерном канале связи [Текст]/А. Эбанга, В.И. Тарханов//Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона. Матер. конф. Политехнического симп. 2006.—СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.—С. 66–67.

УДК 545.81, 623.459.44

В.Д. Куцлов, Р.А. Кянджециан, В.Я. Кателевский, В.П. Валухов

## СВЕТОРАССЕЯНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ГАЗОАНАЛИЗАТОРАХ НА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЯДРАХ КОНДЕНСАЦИИ

Газоанализаторы, основанные на методе молекулярных ядер конденсации (МоЯК), обладают наивысшей чувствительностью к различным детектируемым веществам. В основе метода лежит ряд физико-химических воздействий на непрерывный поток газа-носителя с определяемыми примесями, в результате которых размер частиц полученного аэрозоля примерно в 1000 раз превышает размер исходной молекулы. Рассеивающая способность частицы аэрозоля к падающему свету увеличивается в  $\sim 10^5 \div 10^6$  раз и частица аэрозоля, в центре которой находится молекула детектируемого вещества, эффективно обнаруживается по светорассеянию. В [1] излагаются основы метода молекулярных ядер конденсации и рассматриваются его преимущества по сравнению с другими методами газового анализа. Там же приводятся структурная схема и конструкция разработанного автоматического высокочувствительного газоанализатора. На разработанном газоанализаторе достигнута уникальная чувствительность к детектируемым веществам (типа карбониллов металлоорганических и элементоорганических соединений), что открывает возможности использования газоанализаторов в различных специальных применениях.

Концентрация молекул аэрозоля связана с фототоком  $J = n \cdot j$ , где  $J$  – фототок нефелометра;  $n$  – счетная концентрация (число частиц в единице объема) аэрозольных частиц, полученных на ядрах конденсации,  $\text{см}^{-3}$ ;  $j$  – фототок светорассеяния аэрозольных частиц с концентрацией 1  $\text{см}^{-3}$ . В свою очередь счетная концентрация частиц аэрозоля  $n$  связана со счетной концентрацией молекул примесей  $m$  через коэффициент потерь  $A = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3$ , где  $A$  – безразмерный коэффициент, численно равный доле всех молекул примеси, превращенных в аэрозольные частицы (или общий коэффициент проявления);  $a_1$  – выход реакции конвертирования;  $a_2$  – коэффициент доставки молекулярных ядер конденсации в зону проявления;  $a_3$  – истинный коэффициент проявления, равный вероятности образования

аэрозольной частицы на ядре конденсации, достигшем зоны проявления. Таким образом, минимальная измеряемая счетная концентрация проявленных ядер конденсации  $n_{\min}$ ,  $\text{см}^{-3}$  связана с минимальной измеряемой счетной концентрацией молекул примеси  $m_{\min}$ ,  $\text{см}^{-3}$  соотношением  $n_{\min} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot m_{\min}$ . Достижимые значения коэффициентов  $a_1 \geq 0,5$ ,  $a_2 \approx 0,1$ ,  $a_3 \approx 1$ .

Для регистрации МоЯК необходимы столь высокие пересыщения проявляющего вещества, что при оптимальном режиме проявления МоЯК возникает фон спонтанной нуклеации  $n_{\min}$ . Процессы образования частиц аэрозоля в пересыщенном паре в результате спонтанной нуклеации (фон) и инициированной нуклеации на ядрах конденсации имеют схожий характер и связаны с преодолением энергетического барьера. Скорость обоих процессов возрастает с ростом пересыщения, при этом максимальной величине отношения сигнала (т. е. концентрации аэрозольных частиц, выросших на ядрах конденсации) к фону (т. е. концентрации спонтанно образовавшихся аэрозольных частиц) соответствует некий оптимальный уровень пересыщения и фона спонтанной нуклеации. В статье [2] показано, что  $n_{\min} \leq 6 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$ , а минимальная массовая концентрация примеси составляет  $\sim 10^{-13}$  мг/л, что существенно превосходит чувствительность всех известных хроматографических детекторов.

В работе [3] исследования конденсационного укрупнения аэрозольных частиц выявили количественные закономерности этого процесса. Установлено, что радиус  $r_0$  укрупненных частиц не зависит от радиуса  $r_{\text{исх}}$  исходных частиц аэрозоля при  $r_{\text{исх}} \ll r_0$  и не зависит от их счетной концентрации  $n$ , пока масса пара в частичном объеме  $1/n$  много больше массы укрупненной частицы, т. е. выполняется соотношение  $n \ll 3C/4\pi r_0^3 \gamma$ , где  $C$  – весовая концентрация конденсирующегося пара;  $\gamma$  – удельный вес конденсата вещества укрупнителя. Следовательно, все частицы укрупненного аэрозоля имеют одинаковый размер, сохраняющийся постоянным ( $r_0 = \text{const}$ ) в широком

интервале значений  $r_{исх}$  и  $n$  частиц исходного аэрозоля.

Аэрозольные частицы в газоанализаторах на молекулярных ядрах конденсации образуются в конденсационных устройствах за счет обрастания молекулы детектируемого вещества молекулами так называемого *вещества проявителя* (*укрупнителя*). В качестве проявляющих веществ используются сложные эфиры, карбоновые кислоты, амины, аминокислоты и другие органические соединения с активными функциональными группами. Хорошими укрупняющими свойствами обладает диизобутилфталат ( $C_{16}H_{22}O_4$  – диизобутиловый эфир фталевой кислоты). Аэрозольные частицы диизобутилфталата имеют вещественный показатель преломления  $N_1 = 1,49$ , что и учитывается при расчете светорассеивающих свойств аэрозоля в детекторе МоЯК.

В газоанализаторах, основанных на методе МоЯК, радиусы рассеивающих частиц диизобутилфталата имеют малый разброс и составляют 0,3 мкм, что сопоставимо с длиной волны оптического излучения. Поэтому применима теория Ми, рассматривающая рассеяние света на сферических частицах, размеры которых сравнимы с длиной световой волны  $\lambda$ . Частицы дисперсной системы рассеивают свет некогерентно, т. е. независимо друг от друга. Экспериментально доказано, что для некогерентного рассеяния света достаточно, чтобы расстояние между центрами частиц равнялось 3–4 радиусам [4]. В газоанализаторах на МоЯК это условие выполняется с большим запасом и интерференцией между рассеянным на соседних частицах светом можно пренебречь.

Рассеяние света происходит при взаимодействии электромагнитных волн с электронами рассеивающего вещества. Падающие волны вызывают периодические колебания в системе электронов, испускающих вторичные волны, которые и составляют рассеянное излучение. В него входят также дифрагированная, преломленная и отраженная составляющие, имеющие большое значение при рассеянии света макроскопическими частицами. Для расчета рассеянного излучения Релей рассмотрел модель, в которой электроны заменены на линейные осциллирующие диполи или группы диполей. Теория Релея применима только к частицам, размер которых много меньше длины волны падающего света. Теория Ми, основанная на теории электромагнитного поля, представляет собой строгое решение задачи рассеяния электромагнит-

ных волн и не имеет ограничений на радиус рассеивающих частиц по сравнению с длиной волны оптического излучения. При радиусе рассеивающих частиц  $r_0 \ll \lambda$  формулы теории Ми переходят в формулы для релейского рассеяния.

Рассмотрим задачу Ми – задачу рассеяния плоской электромагнитной волны на однородном шаре (рис. 1) [5, 6]. Применительно к аэрозольным частицам газоанализатора на МоЯК шар будем считать диэлектрическим.

Амплитуды падающего и рассеянного полей в дальней зоне связаны соотношениями  $\begin{pmatrix} E_{\parallel s} \\ E_{\perp s} \end{pmatrix} = \frac{e^{k(R-z)}}{-ikR} \begin{pmatrix} S_2 & 0 \\ 0 & S_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\parallel i} \\ E_{\perp i} \end{pmatrix}$ , где  $k$  – волновой вектор;  $S_1$  и  $S_2$  – элементы амплитудной матрицы рассеяния; индекс  $i$  – определяет падающую волну; индекс  $s$  – рассеянную.

Если падающий свет полностью поляризован в направлении, параллельном плоскости рассеяния то интенсивность рассеянного света имеет вид  $I_s = \frac{1}{k^2 R^2} \cdot |S_2|^2 \cdot I_i$ , рассеянный свет при этом тоже оказывается полностью поляризованным параллельно этой плоскости рассеяния. Если падающий свет поляризован перпендикулярно плоскости рассеяния, то  $I_s = \frac{1}{k^2 R^2} \cdot |S_1|^2 \cdot I_i$ , рассеянный свет также поляризован перпендикулярно плоскости рас-

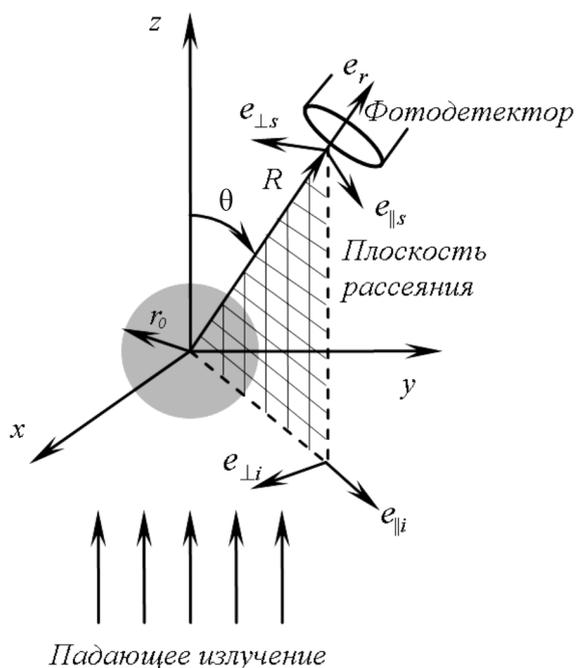


Рис. 1. Рассеяние света на однородном шаре

сеяния. Если падающий свет неполяризован, то  $I_s = \frac{1}{k^2 R^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot (|S_1|^2 + |S_2|^2) \cdot I_i$ . Введем обозначение  $S_{11} = \frac{1}{2} \cdot (|S_1|^2 + |S_2|^2)$  – элемент  $S_{11}$  матрицы рассеяния отдельной частицы. Матрица рассеяния  $|S_{ij}|$  представляет собой матрицу размером  $4 \times 4$ , через нее осуществляется связь параметров Стокса для падающего и рассеянного света.

Значения элементов амплитудной матрицы рассеяния  $S_1$  и  $S_2$  для однородного шара были рассчитаны Ми:

$$S_1 = \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot (a_n \pi_n + b_n \tau_n); \quad (1)$$

$$S_2 = \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot (a_n \tau_n + b_n \pi_n),$$

где  $a_n, b_n$  – коэффициенты рассеянного поля (коэффициенты Ми);  $\pi_n, \tau_n$  – угловые коэффициенты рассеяния.

Коэффициенты рассеянного поля принимают значения:

$$a_n = \frac{\mu m^2 j_n(mx) [x j_n'(x)] - \mu_1 j_n(x) [mx j_n'(mx)]}{\mu m^2 j_n(mx) [x h_n^{(1)'}(x)] - \mu_1 h_n^{(1)}(x) [mx j_n'(mx)]}, \quad (2)$$

$$b_n = \frac{\mu_1 j_n(mx) [x j_n'(x)] - \mu j_n(x) [mx j_n'(mx)]}{\mu_1 j_n(mx) [x h_n^{(1)'}(x)] - \mu h_n^{(1)}(x) [mx j_n'(mx)]},$$

где штрих означает дифференцирование по аргументу, стоящему в круглых скобках, а через  $x$  и  $m$  обозначены, соответственно, параметр дифракции  $x = kr_0 = \frac{2\pi N r_0}{\lambda}$  и относительный показатель преломления  $m = \frac{k_1}{k} = \frac{N_1}{N}$ ;  $N_1$  и  $N$  – показатели преломления частицы и среды соответственно. В выражении введены общепринятые обозначения:  $\lambda$  – длина волны рассеиваемого света;  $j_n$  – сферическая функция Бесселя порядка  $n$ ;  $h_n^{(1)}$  – сферическая функция Ганкеля порядка  $n$ . Формулы позволяют учесть не только рассеяние, но и поглощение света микрочастицами. Для этого следует рассматривать  $m$  как комплексный показатель преломления относительно окружающей среды [5].

Угловые коэффициенты рассеяния представляют собой функции

$$\pi_n = \frac{P_n^1}{\sin \theta} \quad \text{и} \quad \tau_n = \frac{dP_n^1}{d\theta}, \quad (3)$$

где  $P_n^1$  – присоединенные функции Лежандра первого рода.

Значения угловых коэффициентов рассеяния вычисляются с помощью рекуррентных формул:

$$\pi_n = \frac{2n-1}{n-1} \cdot \cos \theta \cdot \pi_{n-1} - \frac{n}{n-2} \cdot \pi_{n-2}; \quad (4)$$

$$\tau_n = n \cos \theta \cdot \pi_n - (n+1) \cdot \pi_{n-1}.$$

Начальные значения для вычисления по рекуррентной схеме следующие:  $\pi_0 = 0, \pi_1 = 1, \pi_2 = 3 \cos \theta; \tau_0 = 0, \tau_1 = \cos \theta, \tau_2 = 3 \cos 2\theta$  [7]. На рис. 2 показаны полярные кривые  $\pi_n$  и  $\tau_n$  для  $n=1 \div 5$ . Обе функции изображены в одном масштабе.

Функции принимают как положительные, так и отрицательные значения. Так, например,  $\tau_2$  положительна в интервале углов от 0 до  $45^\circ$ , отрицательна от  $45$  до  $135^\circ$  и положительна от  $135$  до  $180^\circ$ . С ростом  $n$  число лепестков растет, и в результате лепестков в направлении вперед становится все уже.

Число членов, требуемых для достижения нужной точности при расчетах по теории Ми, может оказаться чрезвычайно большим. Приведенные выше формы записи коэффициентов рассеянного поля  $a_n$  и  $b_n$  не являются самыми подходящими для расчетов.

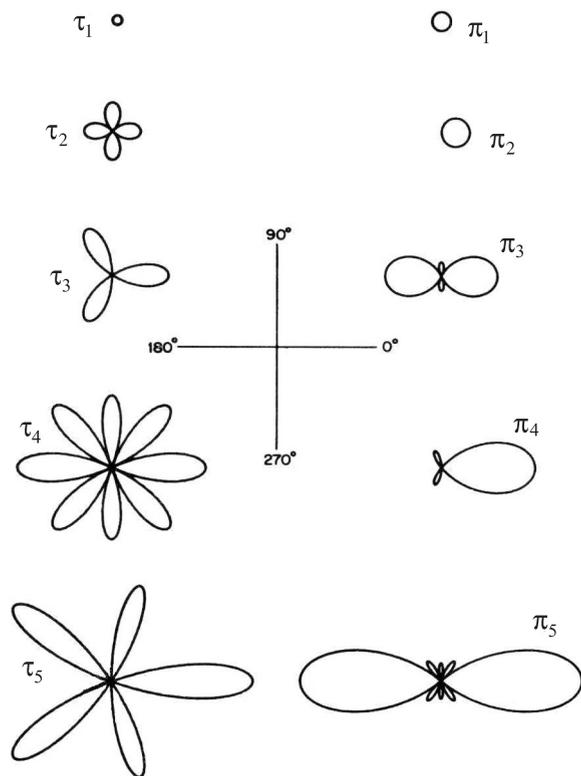


Рис. 2. Полярные кривые для первых пяти угловых функций [5]

Коэффициенты ряда рассеяния можно упростить, введя функции Риккати–Бесселя:  $\psi_n(\rho) = \rho j_n(\rho)$ ,  $\xi_n(\rho) = \rho h_n^{(1)}(\rho)$ . Если принять, что магнитная проницаемость частицы и окружающей среды одна и та же, то

$$a_n = \frac{m\psi_n(mx)\psi'_n(x) - \psi_n(x)\psi'_n(mx)}{m\psi_n(mx)\xi'_n(x) - \xi_n(x)\psi'_n(mx)}, \quad (5)$$

$$b_n = \frac{\psi_n(mx)\psi'_n(x) - m\psi_n(x)\psi'_n(mx)}{\psi_n(mx)\xi'_n(x) - m\xi_n(x)\psi'_n(mx)}.$$

При  $m$ , стремящемся к единице,  $a_n$  и  $b_n$  стремятся к нулю.

Дальнейшие упрощения [5] связаны с введением логарифмической производной  $D_n(\rho) = \frac{d}{d\rho} \ln \psi_n(\rho)$ . В результате выражения для коэффициентов ряда рассеяния можно записать в виде

$$a_n = \frac{[D_n(mx)/m + n/x]\psi_n(x) - \psi_{n-1}(x)}{[D_n(mx)/m + n/x]\xi_n(x) - \xi_{n-1}(x)}, \quad (6)$$

$$b_n = \frac{[mD_n(mx) + n/x]\psi_n(x) - \psi_{n-1}(x)}{[mD_n(mx) + n/x]\xi_n(x) - \xi_{n-1}(x)},$$

где использованы рекуррентные соотношения

$$\psi'_n(x) = \psi_{n-1}(x) - \frac{n\psi_n(x)}{x}, \quad (7)$$

$$\xi'_n(x) = \xi_{n-1}(x) - \frac{n\xi_n(x)}{x}$$

для исключения производных  $\psi'_n$  и  $\xi'_n$ . Полученные соотношения представляют собой одну из многих возможных форм записи коэффициентов ряда рассеяния, более удобную для расчетов. Логарифмическая производная удовлетворяет рекуррентному соотношению

$$D_{n-1} = \frac{n}{\rho} - \frac{1}{D_n + n/\rho}, \quad (8)$$

являющемуся следствием рекуррентных соотношений (7) для функций Риккати–Бесселя. С вычислительной точки зрения целесообразно  $D_n(mx)$  вычислять по схеме обратной рекурсии, а  $\xi_n(x)$  и  $\psi_n(x)$  – по схеме прямой рекурсии.

Расчеты по теории Ми для аэрозольных частиц диизобутилфталата в газоанализаторах, основанных на детектировании молекулярных ядер конденсации, были проведены в пакете MATLAB и представлены на рисунках.

На рис. 3 показана зависимость значения элемента  $S_{11}$  матрицы рассеяния одной частицы от длины оптического излучения при углах рассея-

ния 5, 20 и 40°. Именно параметр  $S_{11}$  пропорционален интенсивности рассеянного поля в случае неполяризованного источника света. Наличие пульсаций объясняется интерференцией рассеянной и падающей оптических волн.

Зависимость значения элемента  $S_{11}$  матрицы рассеяния одной частицы от угла рассеяния при различных длинах волн оптического излучения представлены на рис. 4.

Рассеяние света аэрозольными частицами имеет интерференционный характер, интенсивность рассеянного поля в направлении вперед примерно в 100 раз превышает ее величину в обратном направлении и убывает с увеличением длины волны оптического излучения и угла рассеяния.

Рассеянное излучение регистрируется фотодетектором, расположенным в дальней зоне на расстоянии  $R$  от частицы. Фотодетектор коллимирован по отношению к падающему свету и имеет площадь  $S_d$  (ориентированную по нормали к  $e_r$ ) достаточно малую, так что интенсивность  $I_{s\Omega}$  почти не меняется в пределах приемника. Для определения спектральной плотности мощности рассеянного поля, падающего на фотодетектор, необходимо провести интегрирование интенсивности  $I_{s\Omega}$  в телесном угле, под которым из центра частицы видна фоточувствительная площадка фотодетектора  $\Omega = S_d/R^2$ . Тогда спектральная плотность мощности рассеянного поля на фотодетекторе

$$P_\lambda(\lambda) = \frac{P_{0\lambda}(\lambda)}{(kR)^2} \cdot \int_{\Omega} I_{s\Omega}(\theta, \varphi) d\Omega = \frac{P_{0\lambda}(\lambda) \cdot I_s(\theta) \cdot \lambda^2 \cdot r_d^2}{4\pi \cdot R^4}, \quad (9)$$

где  $P_{0\lambda}(\lambda)$  – спектральная плотность мощности источника оптического излучения в детекторе МоЯК.

Для расчетов приняты следующие значения: радиус светочувствительной площадки фотодетектора  $r_d = 1$  см, расстояние до фотодетектора  $R = 10$  см. Соответственно, телесный угол  $\Omega = 0,0628$  рад. Расчеты проводились для случая неполяризованного света, результаты представлены на рис. 5 и 6.

Зависимость мощности рассеянного поля, падающего на фотодетектор, от длины волны и угла рассеяния представлена на рис. 7.

Наилучшие результаты по чувствительности газоанализатора на МоЯК к детектируемым ве-

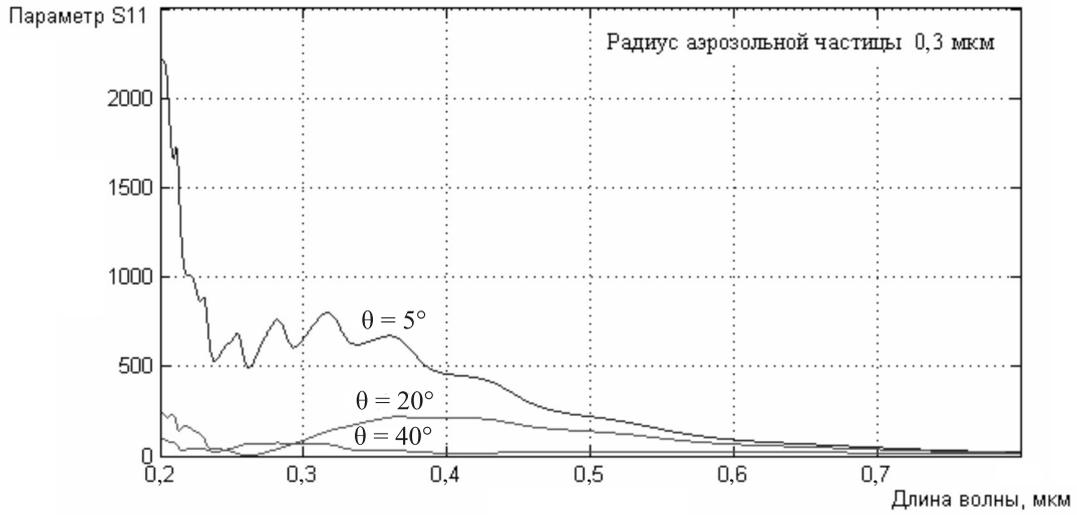


Рис. 3. Зависимость значения элемента  $S_{11}$  матрицы рассеяния от длины волны оптического излучения

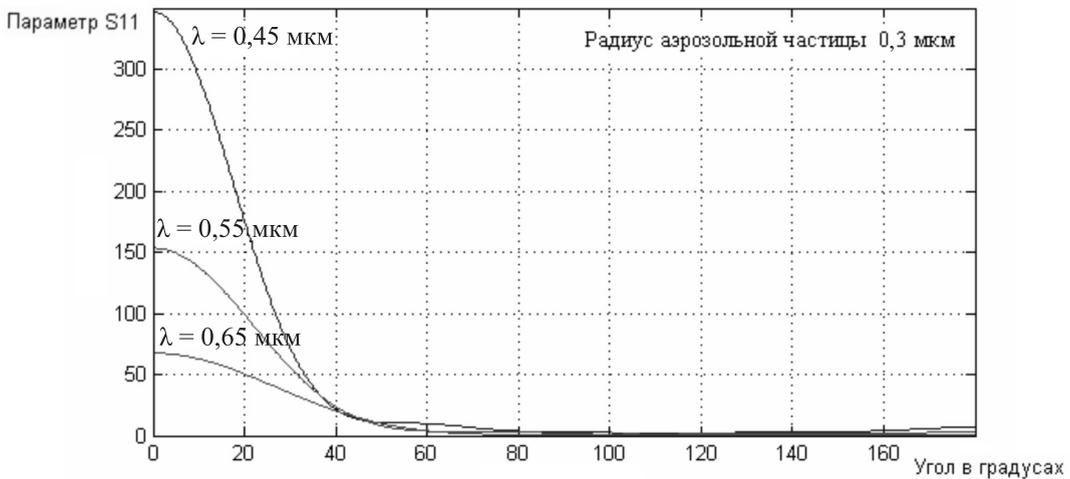
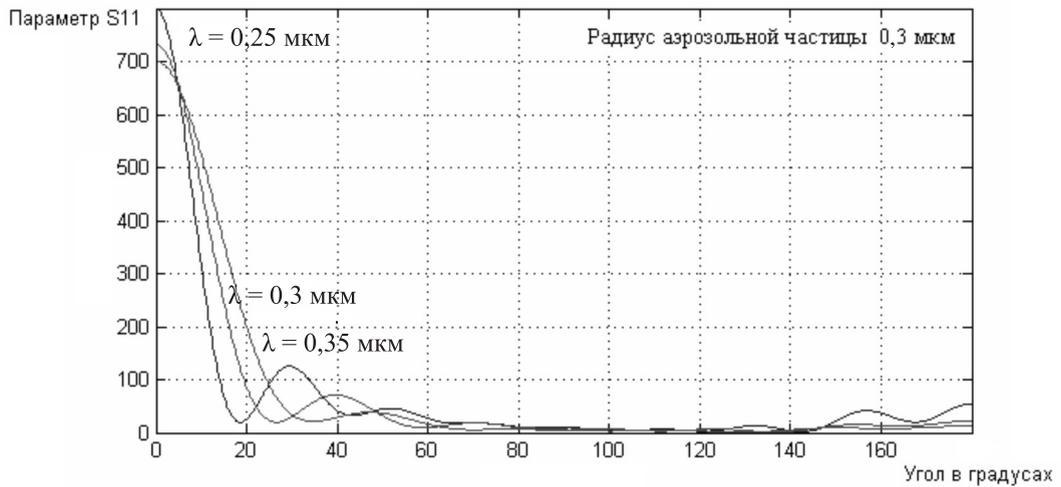


Рис. 4. Зависимость значения элемента  $S_{11}$  матрицы рассеяния одной частицы от угла рассеяния

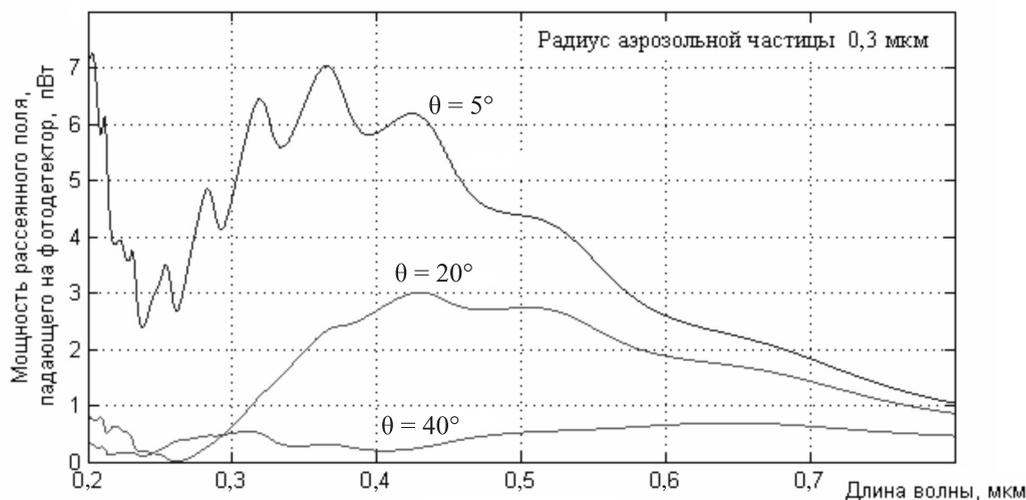


Рис. 5. Зависимость мощности рассеянного поля, падающего на фотодетектор, от длины волны

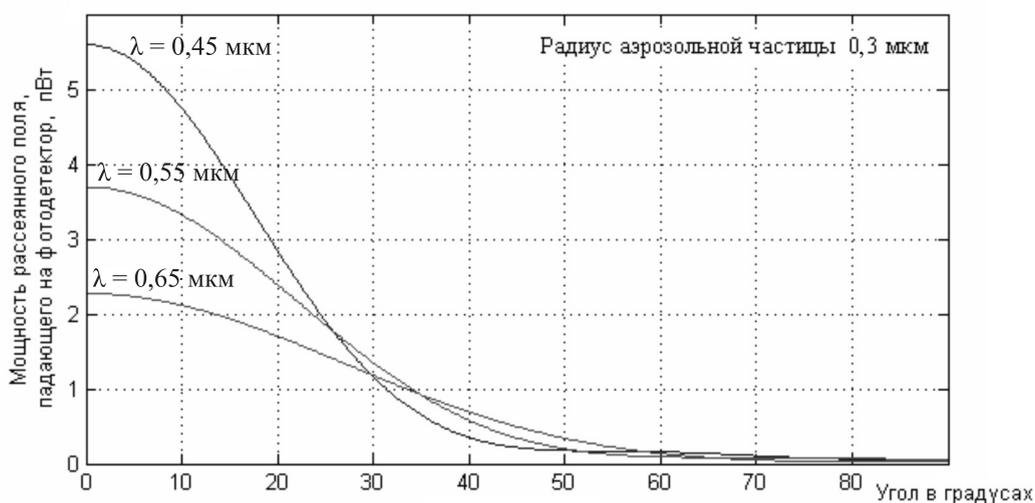


Рис. 6. Зависимость мощности рассеянного поля, падающего на фотодетектор, от угла рассеяния

ществам можно получить при использовании в фотометре яркого белосветного суперлюминесцентного светодиода. Спектральная характеристика таких светодиодов имеет ярко выраженный максимум в области излучения сине-фиолетового цвета и ее удается аппроксимировать полиномом 12-й степени с коэффициентами по убыванию степени  $\lambda$  в мкм:

$$\begin{aligned}
 & 10^{13} (0,043745503944156 \cdot \lambda^{12} - \\
 & - 0,310229880083148 \cdot \lambda^{11} + \\
 & + 1,005239154291580 \cdot \lambda^{10} - \\
 & - 1,967960472618958 \cdot \lambda^9 + \\
 & + 2,592403236799340 \cdot \lambda^8 - \\
 & - 2,420757424974991 \cdot \lambda^7 + \\
 & + 1,643012709180685 \cdot \lambda^6 -
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 & - 0,816656980141273 \cdot \lambda^5 + \\
 & + 0,295023132506219 \cdot \lambda^4 - \\
 & - 0,075542016754531 \cdot \lambda^3 + \\
 & + 0,013013409560701 \cdot \lambda^2 - \\
 & - 0,001354139506679 \cdot \lambda + 0,000064366278632).
 \end{aligned}$$

Спектральная плотность мощности излучения одноваттного белосветного суперлюминесцентного светодиода  $P_{0\lambda}(\lambda)$  показана на рис. 8.

Спектральная плотность мощности рассеянного излучения, падающего на фотодетектор, при использовании белого светодиода  $P_{\lambda}(\lambda)$  представлена на рис. 9.

Интегральную мощность, регистрируемую фотодетектором, окончательно получаем интегрированием спектральной плотности мощности

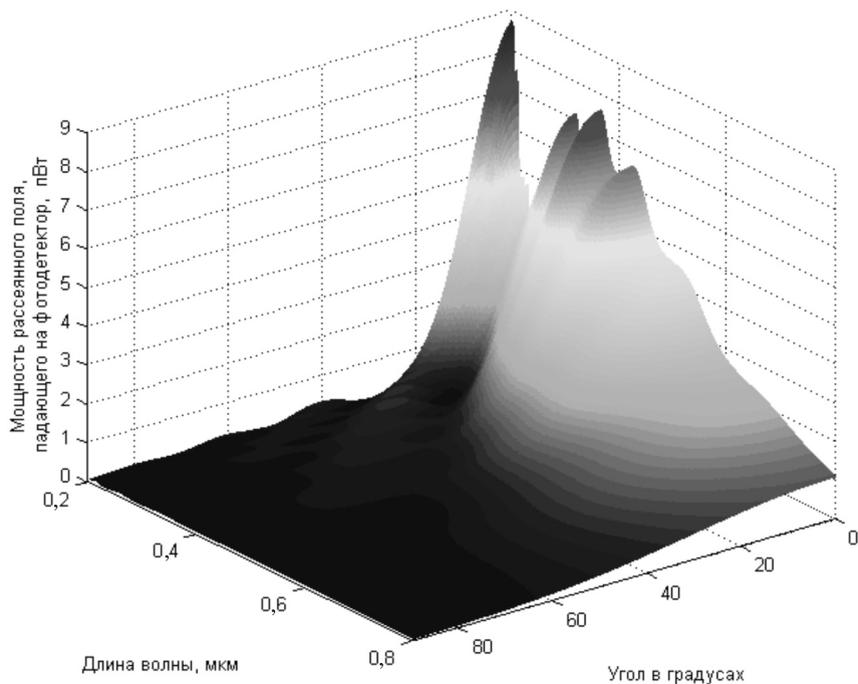


Рис. 7. Зависимость мощности рассеянного поля, падающего на фотодетектор, от длины волны и угла рассеяния

рассеянного поля по длине волны оптического излучения

$$P_{\text{инт}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

где  $\lambda_1 = 0,43$  мкм,  $\lambda_2 = 0,7$  мкм – значения длин волн, в диапазоне которых действует аппроксимация спектральной характеристики белосветного суперлюминесцентного светодиода. Зависимость интегральной мощности  $P_{\text{инт}}$  рассеянного излучения, регистрируемого фотодетектором с радиу-

сом светочувствительной площадки  $r_d = 1$  см на расстоянии  $R = 10$  см, от угла наблюдения фотодетектора (совпадает с углом рассеяния в расчетах) представлена на рис. 10 для радиусов аэрозольных частиц 0,25, 0,3 и 0,35 мкм. Из характера зависимостей в идеале следует целесообразность изготовления фотометров в газоанализаторах на МоЯК с углом приема рассеянного излучения не более  $10^\circ$ .

Однако в реальности дело обстоит таким образом, что минимально измеримая фотометром

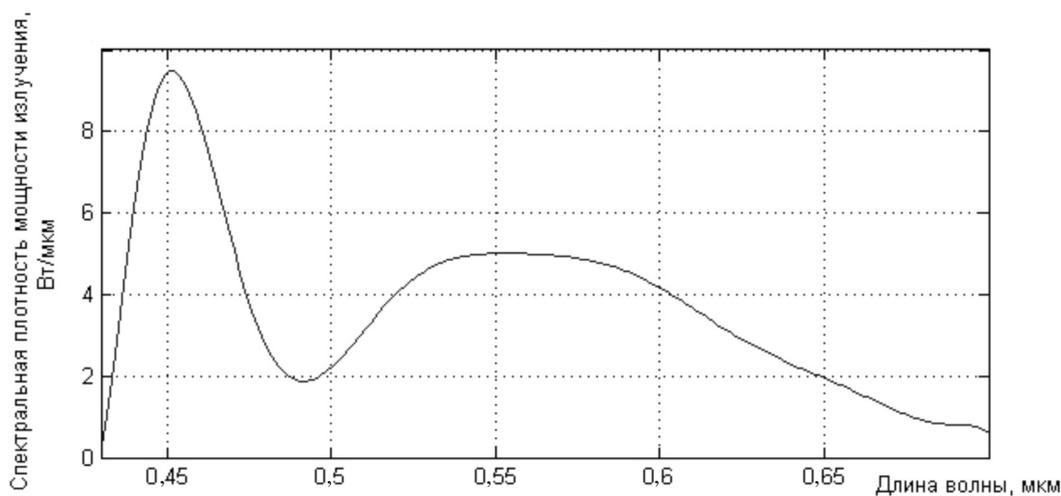


Рис. 8. Спектральная плотность мощности излучения светодиода

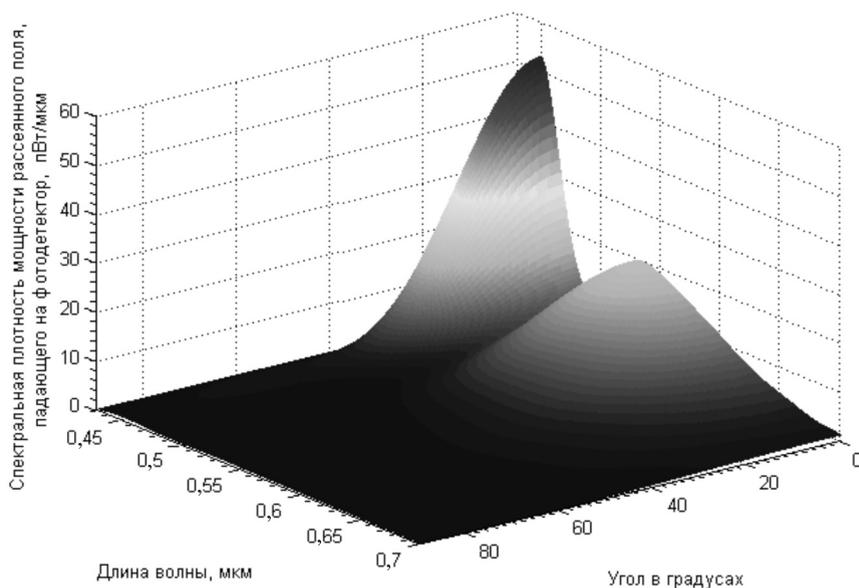


Рис. 9. Спектральная плотность мощности рассеянного излучения, падающего на фотодетектор, при использовании белого светодиода

концентрация аэрозольных частиц лимитируется не столько интенсивностью попадающего на ФПУ рассеянного аэрозольными частицами света, сколько отношением этой интенсивности к величине засветки ФПУ за счет релеевского рассеяния газовой компоненты аэрозоля и паразитной засветки ФПУ светом, рассеянным элементами (стенками, световыми ловушками и шторками) аэрозольной камеры фотометра. Осуществить наблюдения под углом  $10^\circ$  можно только с очень длиннофокусной оптикой. Поэтому компромиссным явля-

ется значение угла  $\theta = 40 \div 45^\circ$ , что обеспечивает достаточную мощность рассеянного одной частицей света и достаточно малое значение паразитной засветки фотоприемного устройства.

Радиусы аэрозольных частиц в газоанализаторах на методе МoЯК имеют незначительный разброс вокруг значения  $0,3 \text{ мкм}$ .

Рассеяние света аэрозольными частицами носит интерференционный характер, интенсивность рассеянного поля в направлении вперед примерно

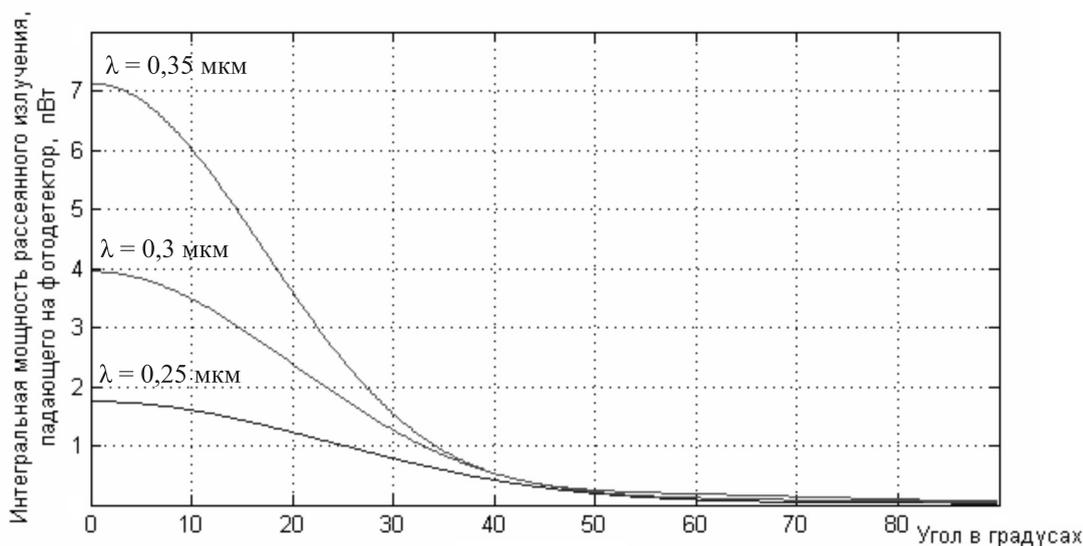


Рис. 10. Зависимость интегральной мощности рассеянного излучения, падающего на фотодетектор, от угла рассеяния

в 100 раз превышает ее величину в обратном направлении и убывает с увеличением длины волны оптического излучения и угла рассеяния.

При технической реализации фотометров в газоанализаторах на методе МоЯК следует обеспечивать угол приема рассеянного излучения  $\theta = 40 \div 45^\circ$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Купцов, В.Д.** Газоанализаторы на основе эффекта молекулярных ядер конденсации [Текст]/ В.Д. Купцов, Р.А. Кянджециан, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2010.–№ 6 (113).–С. 145–151.
2. **Кjandzhetsian, R.A.** Development and creation of automatic highly sensitive gas analyzers based on molecular condensation nucleus effect to detect dangerous substances[Текст]/R.A. Kjandzhetsian, V.J. Katelevski, V.P. Valjuhov, S.V. Demin, V.D. Kuptsov, L.M. Vinogradsky//Proc. of ISMTII–2009.–ISTC Special Session.–P. 51–54.
3. **Коган, Я.И.** Укрупнение и измерение ядер конденсации в непрерывном потоке [Текст]/ Я.И. Коган, З.А. Бурнашева//Журнал Физ. Хим. –1960.–Т. 34.–Вып.12.–С. 26–31.
4. **Грин, Х.** Аэрозоли – пыли, дымы и туманы [Текст]/Х. Грин, В. Лейн.–Л.: Химия, 1972.–С. 428.
5. **Борен, К.** Поглощение и рассеяние света малыми частицами [Текст]/ К. Борен, Д. Хафмен.–М.: Мир, 1986.–660 с.
6. **Хюлст, Г.** Рассеяние света малыми частицами [Текст]/Г. Ван де Хюлст.–М.: Иностранная литература, 1961.–536 с.
7. **Дейрменджан, Д.** Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами [Текст]/Д. Дейрменджан.–М.: Мир, 1971.–165 с.



# Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

УДК 777.555

*А.В. Маркелова*

## **УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

Одна из основных задач университета – удовлетворение потребности общества и государства в квалифицированных специалистах с высшим профессиональным образованием и в научно-педагогических кадрах высшей квалификации. Для решения этой задачи необходимо, с одной стороны, проводить отбор абитуриентов, наиболее подготовленных для получения дальнейшего образования, с другой стороны, при обеспеченности ресурсами проводить подготовку конкурентоспособных специалистов.

В настоящее время наиболее актуально формирование основных образовательных программ в связи с разработкой новых Федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС 3-го поколения) и переходом высшей школы в России на данные стандарты.

При разработке основных образовательных программ следует учитывать анализ образовательных программ ведущих зарубежных вузов в конкретной области. Работы в области сопоставительного анализа образовательных программ в УГАТУ проводятся специалистами в течение ряда лет [5, 8, 10]. В данной статье предлагается в процессе разработки образовательных программ по ФГОС использовать результаты сопоставительного анализа образовательных программ подготовки информатиков в ведущих вузах, а также учитывать рекомендации международных образовательных стандартов, имеющих отношение к компьютерам и программированию, и требования рынка труда.

### **Управление образовательным процессом в университете**

Управление образовательным процессом в вузе в соответствии с Федеральными государственными стандартами (ФГОС) 3-го поколения

представляет собой процесс подготовки выпускников, обладающих компетенциями, с использованием новых технологий посредством информационных воздействий, вырабатываемых руководителями всех уровней. Процесс подготовки выпускников может быть представлен как система управления, включающая аппарат управления и учебный процесс. При этом на входе такой системы мы наблюдаем абитуриентов, имеющих различную подготовку, а на выходе – выпускников университета.

В качестве воздействия внешней среды могут выступать законодательные акты, государственные образовательные стандарты высшего профессионального образования, требования рынка труда, деятельность конкурентов.

В качестве обратной связи в системе управления подготовкой выпускников могут выступать результаты тестирования при контроле остаточных знаний, который проходят студенты в процессе обучения. Промежуточные аттестации являются оценкой компетенции студентов на определенном этапе обучения.

Образовательная программа включает в себя комплект нормативных документов: учебный план, программы учебных дисциплин и производственных практик, а также требования к итоговой аттестации. Учебный план – основной документ, определяющий структуру учебного процесса на факультете, перечень и объемы учебных дисциплин, последовательность их изучения, названия и продолжительность практик, используемые виды занятий (лекции, лабораторные и практические занятия, семинары и др.), аттестации, формы контроля и т. д.

При вступлении в силу Государственных образовательных стандартов 3-го поколения, основной целью которых является внедрение в вузы



Рис. 1. Управление процессом формирования ООП

пунктов Болонского соглашения (введение трехступенчатой системы образования, системы зачетных единиц (ECTS), а также большей свободы в выборе учебных дисциплин студентами), необходимо будет привести в соответствие с ними образовательные программы (рис. 1).

### Квалификационные требования рынка труда ИТ-специалистов и международный образовательный стандарт Computing

Динамичность и инновационность сферы ИТ, согласно анализу рынка труда, требует постоянного обновления учебных программ и содержания по ИТ-дисциплинам [7].

Ассоциацией предприятий компьютерных и информационных технологий (АПКИТ) при поддержке Мининформсвязи РФ и финансировании ИТ-бизнеса были разработаны профессиональные стандарты в области ИТ: программист, системный архитектор, специалист по информационным системам, системный аналитик, специалист по системному администрированию, менеджер информационных технологий, менеджер по продажам решений и сложных технических систем, специалист по информационным ресурсам, администратор баз данных.

Ряд ФГОС для ИТ-специалистов разработан на основе соответствующих профессиональных стандартов, так, например, Федеральный государственный образовательный стандарт 3-го поколения по направлению «Прикладная информатика» разработан учебно-методическими объединениями при Московском государственном университете экономики, статистики и информатики (МЭСИ) и Российском государственном гуманитарном университете (РГГУ) на основе профессионального стандарта «Специалист по информационным системам». Другая часть ФГОС подготовки бакалавров-информатиков была разработана ранее, чем соответствующие професси-

ональные стандарты. Именно при разработке образовательных программ на основе таких ФГОС рекомендуется изучение соответствующих профессиональных стандартов.

Квалификационные требования [7] в области ИТ-технологий содержат следующие разделы: введение, область применения, описание квалификационных уровней, указания сегмента сферы труда (количество квалификационных уровней в профессиональном стандарте); профессиональный стандарт по профессии (например, «Системный архитектор»).

При разработке новых образовательных программ подготовки информатиков рекомендуется учитывать рекомендации Международного образовательного стандарта Computing, включающего в себя [9]: Computer Engineering (Разработка компьютеров), Computer Science (Информатика), Information Technology (Информационные технологии), Software Engineering (Программная инженерия) [1–4, 7].

### Государственные образовательные стандарты подготовки информатиков

Анализ требований к обязательному минимуму содержания основной образовательной программы подготовки бакалавра (ГОС 2-го поколения) по направлению 552800 «Информатика и вычислительная техника» позволяет сделать выводы о значительной доле следующих циклов в структуре образовательной программы (рис. 2, а): общие гуманитарные и социально-экономические дисциплины (ГСЭ) – 0,25; общие математические и естественно-научные дисциплины (ЕН) – 0,30; общепрофессиональные дисциплины (ОПД) – 0,26. Незначительные доли циклов – специальные дисциплины (СД), факультативы (ФТД). В циклах ГСЭ, ЕН, ОПД доля Федерального компонента относительно суммы часов, отведенных на соответствующий цикл, также значительна: ГСЭ – 0,70, ЕН – 0,84, ОПД – 0,82.

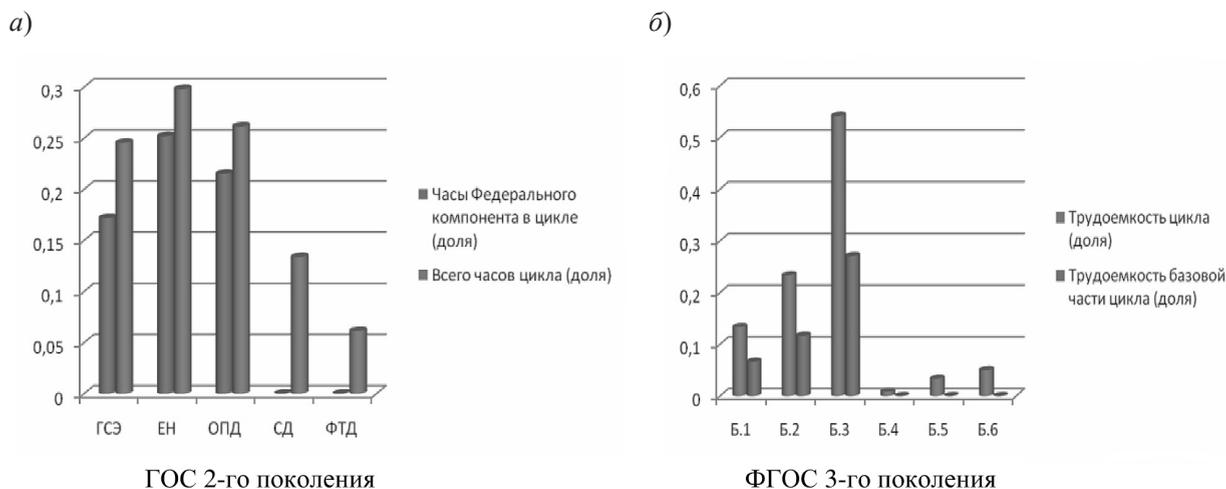


Рис. 2. Структура образовательной программы

Федеральные государственные образовательные стандарты были призваны стать стандартами нового поколения, обеспечивающими дальнейшее развитие уровневое высшего профессионального образования с учетом требований рынка труда. Отличительными особенностями ФГОС ВПО являются: выраженный компетентный характер; разработка пакета стандартов по направлениям как совокупности образовательных программ бакалавра, специалиста и магистра, объединяемых на базе общности их фундаментальной части; обоснование требований к результатам освоения основных образовательных программ в виде компетенций; отсутствие компонентной структуры (федерального, национально-регионального, вузовского) с одновременным значительным расширением академических свобод высших учебных заведений в части разработки основных образовательных программ; установление новой формы исчисления трудоемкости в виде зачетных единиц вместо часовых эквивалентов.

Анализ структуры основной образовательной программы подготовки бакалавра по направлению 552800 «Информатика и вычислительная техника» (ФГОС 3-го поколения) позволяет сделать выводы о значительной доле следующих циклов в структуре образовательной программы (рис. 2, б): гуманитарный, социальный и экономический (Б.1) – 0,13, математический и естественнонаучный (Б.2) – 0,23, профессиональный (Б.3) – 0,54. Незначительные доли циклов – физическая культура (Б.4), учебная и производственная практика (Б.5), итоговая государственная аттестация (Б.6). В циклах Б.1–Б.3 доля базовой части также значительна: Б.1 – 0,50, Б.2 – 0,50, Б.3 – 0,50.

Анализ структур образовательных программ стандартов 2-го и 3-го поколения показывает большую свободу выбора при разработке образовательных программ по ФГОС.

#### Система поддержки принятия решений

Большое разнообразие учебных планов подготовки информатиков как в ведущих университетах России, так и за рубежом, информация о требованиях рынка труда в области ИТ, государственные образовательные стандарты, представленные в разных форматах, требуют обработки и анализа большого объема информации. Накопленный опыт показывает возможность использования для таких задач систем поддержки принятия решений (рис. 3).

Система поддержки принятия решений использует базу данных, содержащую учебные планы и результаты их обработки, ФГОС, профессиональные стандарты, информацию, необходимую для последующего использования. На основе анализа проблемной области определяются модели представления знаний (продукционная, семантическая сеть) в базе знаний, знания на основе анализа нового стандарта. Здесь же хранятся ключевые слова, таблицы. Учебный план может быть представлен семантической сетью. В данном случае разработана комбинация сетевых и продукционных моделей представления знаний. В таких моделях декларативные знания описываются в сетевом компоненте знаний, а процедурные знания – в продукционном [5]. Для учебного плана и дисциплины учебного плана разработана онтология [6].

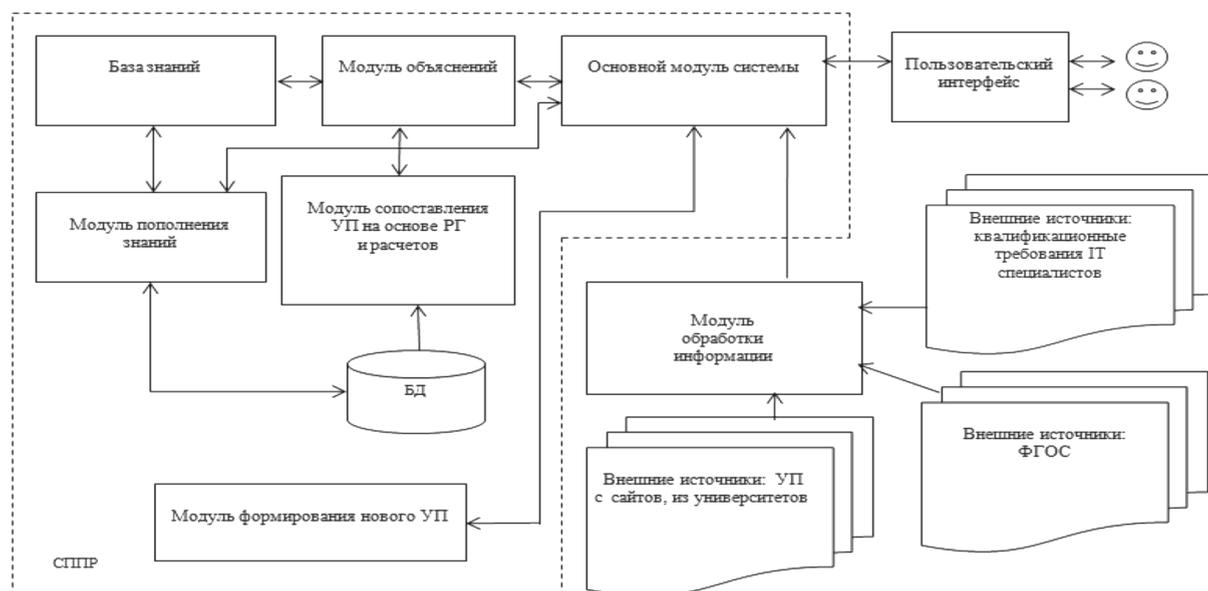


Рис. 3. Система поддержки принятия решений

Пользовательский интерфейс является диалоговым компонентом системы, охватывает все аспекты взаимодействия пользователя и системы поддержки решений.

Как правило, учебные планы различных университетов, предназначенные для проведения сопоставительного анализа, профессиональные стандарты, международные образовательные стандарты, ФГОС имеют разные формы представления: буклеты, брошюры или информация в электронном виде, в текстовой или табличной форме, информация, представленная в форматах .xls, .pdf и др. Модуль преобразования информации, находящийся вне системы поддержки принятия решений, позволяет проводить предварительную обработку информации, полученной из внешних источников, с целью единообразия

формы представления. Этот же модуль позволяет провести предварительную обработку информации о рынке труда информатиков и государственные образовательные стандарты.

### Результаты сравнения учебных планов на примере российского и ведущих европейских университетов

Сопоставительный анализ российской (УГАТУ), бельгийской (Институт имени Поля Ламбана), французской (Университет Марн-ля-Валле), швейцарской (Высшая политехническая школа Лозанны) и люксембургской (Университет Люксембурга) образовательных программ проведен по блокам гуманитарных и социально-экономических дисциплин (ГиСЭД), математических и естественно-научных дисциплин

Сопоставление по блокам дисциплин

Университет (страна)	Блок	ГиСЭД, %	МиЕНД, %	ОПД, %	СД, %
Институт имени Поля Ламбана, Бельгия		10	13	45	32
Университет Люксембурга, Люксембург		11	13	37	39
Университет Марн-ля-Валле, Франция		5	37	38	20
Высшая политехническая школа Лозанны, Швейцария		1	35	33	31
УГАТУ, Россия (стандарт 2-го поколения)		25	31	28	16
Россия (структура ООП ФГОС 3-го поколения)		≈16	≈23	≈53	

(МиЕНД), общепрофессиональных дисциплин (ОПД) и специальных дисциплин (СД). При проведении сопоставительного анализа также рассмотрена структура основной образовательной программы подготовки бакалавров по направлению «Информатика и вычислительная техника» (ФГОС 3-го поколения). Так как производственная практика в зарубежных университетах проводится в рамках специальности, то при сопоставлении она вошла в блок специальных дисциплин.

Результаты сопоставления учебных планов по блокам показаны в таблице.

### Рекомендации разработчикам образовательных программ

При разработке образовательных программ ограничить трудоемкость цикла Б.1 значением нижней границы трудоемкости, отводимой на данный цикл. При этом уделить достаточно времени для изучения иностранного языка. В цикле Б.2 следует особое внимание уделить изучению информатики, математики и физики. Максимально возможное время в рамках ФГОС отвести на профессиональный цикл Б.3.

При формировании вариативных частей с соблюдением положений Болонской декларации необходимо учесть всевозможные интересы студентов: включить в образовательную программу достаточно широкий диапазон дисциплин для выбора. Большое разнообразие проектов, по которым российские студенты имеют возможность часть обучения проходить в зарубежных вузах, приводит к необходимости выбора студентами дисциплин для изучения за рубежом с целью перезачета их в «родном» вузе. Поэтому целесообразно для студентов, ориентированных на получение образования в зарубежных университетах в определенные периоды обучения, разрабатывать образовательные программы, позволяющие выбрать ряд дисциплин для изучения их за рубежом.

Формирование основных образовательных программ должно быть также ориентировано с

учетом подготовки выпускников для различных областей профессиональной деятельности, объектов и видов профессиональной деятельности. При разработке образовательных программ необходимо ориентироваться на соответствие квалификационным требованиям, предъявляемым к ИТ-специалистам. Возможно, необходимо предусматривать преподавание прикладных дисциплин ведущими специалистами в ИТ-области.

По результатам анализа образовательной программы, разработанной на базе государственных стандартов, содержания и трудоемкости дисциплин базовой части образовательной программы могут быть представлены такие рекомендации, как «Сокращение/увеличение трудоемкости дисциплины  $i$  в базовой части», «Изменение содержания дисциплины  $l$  в вариативной части», «Введение дисциплины  $j$  в вариативной части», «Перенос дисциплины  $k$  в другой семестр».

В статье рассмотрена проблема управления процессом основной образовательной программы, отвечающей современным федеральным государственным стандартам, учитывающей, в то же время, требования рынка труда и опыт ведущих зарубежных вузов. Показано, что структура основной образовательной программы Федерального государственного образовательного стандарта 3-го поколения значительно ближе к структурам образовательных программ европейских вузов, чем образовательные программы, разработанные на базе государственных образовательных стандартов 2-го поколения. Предложена система поддержки принятия решений по проблеме управления процессом основной образовательной программы. Приведены наглядные примеры результатов сравнения учебных планов подготовки информатиков университетами разных стран. В результате полученных результатов предложены рекомендации разработчикам образовательных программ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Computing Curricula 2001 (CC2001) [Электронный ресурс]/[2010] URL: [http://www.computer.org/portal/cms\\_docs\\_ieeeecs/ieeeecs/education/cc2001/](http://www.computer.org/portal/cms_docs_ieeeecs/ieeeecs/education/cc2001/)
2. Computing Curricula 2005 [Электронный ресурс]/[2010] URL: [http://www.computer.org/portal/cms\\_docs\\_](http://www.computer.org/portal/cms_docs_)

1. [ieeeecs/ieeeecs/education/cc2001/CC2005](http://www.computer.org/portal/cms_docs_ieeeecs/ieeeecs/education/cc2001/CC2005)
3. Guide to the Software Engineering Body of Knowledge (SWEBOOK) [Электронный ресурс]/[2010] URL: <http://www.swebok.org/ironman/pdf>
4. Software Engineering 2004 (SE 2004) [Электрон-

ный ресурс]/[2010]URL: [http://www.computer.org/portal/cms\\_docs\\_ieeeecs/ieeeecs/education/cc2001/SE2004Volume.pdf](http://www.computer.org/portal/cms_docs_ieeeecs/ieeeecs/education/cc2001/SE2004Volume.pdf)

5. **Гаянова, М.М.** Информационная поддержка принятия решений при анализе университетских образовательных программ [Текст]/М.М. Гаянова// Дис... канд. техн. наук. –Уфа, УГАТУ, 2006.–143 с.

6. **Гузаиров, М.Б.** Инструментарий в системе поддержки принятия решений при управлении процессом разработки образовательной программы: Препринт монографии [Текст]/М.Б. Гузаиров, Н.И. Юсупова, О.Н. Сметанина.–Уфа: Изд-во УНЦ РАН, 2010. –106 с.

7. Официальный сайт АП КИТ [Электронный ре-

сурс]/[2010] URL: [www.apkit.ru/](http://www.apkit.ru/)

8. **Гузаиров, М.Б.** Сопоставительный анализ учебных планов по информатике университетов разных стран [Текст]/М.Б. Гузаиров [и др.]// Мавлютовские чтения: Российская науч.-техн. конф., посв. 80-летию чл.-кор. РАН, проф. Р.Р. Мавлютова: сб. тр.–Уфа: УГАТУ, 2006. Т 1.–№ 5. С. 77–83.

9. **Терехов, А.Н.** Что такое программная инженерия [Текст]/А.Н. Терехов// Программная инженерия.–М.: Новые технологии, 2010. –№1.–С. 40–45.

10. **Гузаиров, М.Б.** Университетские образовательные программы. Модели и методы для сопоставительного анализа [Текст]/ М.Б. Гузаиров [и др.]–Изд-во МАИ, 2006.–117 с.



## НАУЧНЫЙ СЕМИНАР ФТК 17 сентября 2011 г.

Представляем аннотацию доклада руководителя отдела нейроинформатики Центра оптико-нейронных технологий НИИ системных исследований РАН (Москва) доктора физико-математических наук, профессора В.Л. Дунина-Барковского на научном семинаре факультета технической кибернетики.

*В.Л. Дунин-Барковский*

### ПОИСК ПОЛНОГО НАБОРА ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ В МНОГОНЕЙРОННЫХ СИСТЕМАХ

В докладе рассмотрена общая проблема поиска и идентификации элементарных механизмов преобразования и обработки информации в нейронных структурах. Возможности и перспективы успеха такого поиска показаны на примере задачи представления непрерывных величин в многонейронных системах.

Известно, что интенсивность разного рода воздействий (свет, концентрация веществ, сила давления и т. д.) на нервные сенсоры кодируется частотой импульсов. До недавнего времени было мало изучено, как осуществляется кодирование значений непрерывных переменных в тех случаях, когда одиночный сенсор не может передать

весь диапазон значений переменной, и функция представления значений переменной выполняется группой нейронов (компьютерный аналог – много-разрядное представление чисел в ячейках памяти).

Обсуждена одна из возможностей эффективного кодирования (число кодируемых значений  $\sim 2^{\alpha N}$ , где  $N$  – число нейронов) на основе аттракторных нейронных сетей. Кодирование дискретных переменных высокой информативности в подобных системах описывается теорией Дж. Дж. Хопфилда. Оба типа аттракторов (дискретные и непрерывные) в последнее время обнаружены в активности реальных физиологических нейронных структур.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

**АКСЕНОВ Константин Александрович** – докторант кафедры автоматизированных систем управления ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кандидат технических наук.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. (343) 375-41-45, e-mail: Wiper99@mail.ru

**АНТОНОВ Валерий Иванович** – заведующий кафедрой высшей математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-67-50, e-mail: antonovvi@mail.ru

**АНТОНОВ Владимир Феохарович** – и.о. заведующего кафедрой информатики и информационных технологий Пятигорского государственного технологического университета.

357500, г. Пятигорск, ул. 40 лет Октября, д. 56. Тел. (8793) 33-11-37, e-mail: antonovpgtu@mail.ru

**АРСЕНЬЕВ Дмитрий Германович** – проректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 606-62-24

**БЕРКОВСКИЙ Николай Андреевич** – доцент кафедры математики ИМОП Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.

195251, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 28. Тел. (812) 606-62-24, e-mail: berkovsk@mail.ru

**БОРОДИН Андрей Михайлович** – аспирант кафедры автоматики и информационных технологий Уральского федерального университета.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32. Тел. (343) 375-37-53, E-mail: amborodin@acm.org

**БОСТОНОВ Оскар Хамзович** – аспирант кафедры компьютерной математики Уфимского государственного авиационного технического университета.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 230-12-30, e-mail: bostonov@yandex.ru

**ВАСИЛЬЕВ Александр Николаевич** – профессор, доцент, кандидат физико-математических наук Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812)437-34-64, e-mail: a.n.vasilyev@gmail.com

**ВАЛЮХОВ Владимир Петрович** – профессор кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-96-78, e-mail: kuptsov@radio.rphf.spbstu.ru

**ВАН КАЙ** – аспирант кафедры автоматизированных систем управления ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д.19. Тел. (343) 375-41-45

**ВОРОНИН Вячеслав Владимирович** – доцент кафедры радиоэлектронных систем Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса, кандидат технических наук.

346500, г. Шахты, ул. Шевченко, д. 147. Тел. (8636) 22-54-91, e-mail: voronin\_sl@mail.ru

**ВУ ван Куанг** – студент кафедры системы автоматического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел.(812)552-67-50, e-mail: sicili1512@gmail.com

**ГРЕКОВ Артём Владимирович** – преподаватель кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Пермского военного института внутренних войск МВД России.

614112, г. Пермь, ул. Гремячий Лог, д. 1. E-mail: grekartemvl@mail.ru

**ГРЕБЕНКИН Михаил Константинович** – аспирант кафедры автоматики и информационных технологий Уральского федерального университета.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32. Тел. (343) 375-37-53, e-mail: m\_grebenkin@bk.ru

**ГРОМОВ Олег Александрович** – аспирант кафедры автоматизации и телемеханики Пермского государственного технического университета.

614112, г. Пермь, ул. Гремячий Лог, д. 1

**ДЕГТЯРЕВА Ирина Викторовна** – заведующий кафедрой экономической теории Уфимского государственного авиационного технического университета, доктор экономических наук, профессор.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 273-78-35, e-mail: degtjareva@mail.rb.ru

**ДЕНИСОВА Анастасия Александровна** – аспирант кафедры управления качеством Северо-Западного заочного государственного технического университета.

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5. Тел. (812) 335-26-00, e-mail: an-denisova@yandex.ru

**ДОРΟΣИНСКИЙ Леонид Григорьевич** – заведующий кафедрой автоматизированных систем управления ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», доктор технических наук, профессор.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. (343) 375-41-45

**ЗАГАЙНОВ Артем Игоревич** – аспирант кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-67-50, e-mail: zagainov239@gmail.com

**ЗОЛОТОВ Олег Иванович** – профессор кафедры процессов управления и информационных систем Северо-Западного государственного заочного технического университета, кандидат технических наук.

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5. Тел. (812) 335-26-55

**ИВАНОВ Владимир Михайлович** – профессор кафедры информатики ИМОП Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук.

195251, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 28. Тел. (812) 606-62-24

**ИЛЬЯСОВ Барый Галеевич** – заведующий кафедрой технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета, доктор технических наук, профессор.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 273-78-35, e-mail: ilyasov@tc.ugatu.ac.ru

**КАРИМОВ Тимур Наилевич** – аспирант кафедры автоматизации и информационных технологий Камской государственной инженерно-экономической академии.

423810, г. Набережные Челны, пр. Мира, д. 68/19. Тел. (8552) 58-96-17, e-mail: karimovtn@gmail.com

**КАРТАШЕВА Татьяна Анатольевна** – аспирант кафедры технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 273-78-35, e-mail: kartashevata@yandex.ru

**КАТЕЛЕВСКИЙ Вадим Яковлевич** – заведующий лабораторией ОАО «ЭНПО Неорганика», кандидат технических наук.

144001, г. Электросталь Московской области, ул. Маркса, д. 13

**КОВАЛЕНКО Анатолий Николаевич** – профессор кафедры атомных и тепловых энергетических установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-67-50, e-mail: ank@isc.nw.ru

**КОРОТКОВ Александр Станиславович** – профессор кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-76-39, e-mail: korotkov@rphf.spbstu.ru

**КУЗНЕЦОВА Ольга Константиновна** – начальник лаборатории ЛО ЦНИИС, кандидат экономических наук.

196128, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, д. 11. Тел. (812) 369-38-67, e-mail: ok@loniis.org

**КУПЦОВ Владимир Дмитриевич** – докторант кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук, доцент.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-96-78, e-mail: kuptsov@radio.rphf.spbstu.ru

**КУРОЧКИН Леонид Михайлович**. Начальник лаборатории АСУ УМО ГОУ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. 552-65-21, (921) 346-57-67. kurl@ya.ru

**КЯНДЖЕЦИАН Рубен Арамович** – старший научный сотрудник ОАО «ЭНПО Неорганика», кандидат химических наук.

144010, г. Электросталь Московской области, ул. Ялагина, д. 18. Тел. (496) 57-32-131

**ЛЯШЕНКО Александр Леонидович** – доцент кафедры процессов управления и информационных систем Северо-Западного государственного заочного технического университета, кандидат технических наук.

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5. Тел. (812) 335-26-55, e-mail: akuna\_matata\_kmv@mail.ru

**МАДОРСКАЯ Юлия Михайловна** – аспирант кафедры интегрированных компьютерных технологий в промышленности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, к. 4, к. 306. Тел. (812) 552-65-21, e-mail: majulia@yandex.ru.

**МАКАРОВА Елена Анатольевна** – докторант кафедры технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета, кандидат технических наук, доцент.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 273-78-35, e-mail: ea-makarova@mail.ru

**МАЛЫХИНА Галина Федоровна** – заведующий кафедрой информационных измерительных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 22. Тел. (812) 297-60-01

**МАРКЕЛОВА Анастасия Вадимовна** – аспирант кафедры вычислительной математики и кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 284-35-20, e-mail: markelova.anastasia@gmail.com

**МАРЧУК Владимир Иванович** – проректор по научной работе, профессор кафедры радиоэлектронных систем Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса, доктор технических наук.

346500, г. Шахты, ул. Шевченко, д. 147. Тел. (8636) 22-54-91

**МАТВЕЕВ Владимир Александрович** – доцент кафедры алгебры и геометрии Псковского государственного педагогического университета, кандидат физико-математических наук.

180000, г. Псков, пл. Ленина, д. 2. Тел. (8112) 25-23-18, e-mail: matveev176@rambler.ru

**МЕЙЕР Марина Викторовна** – директор по развитию ЛО ЦНИИС.

196128, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, д. 11. Тел. (812)369-38-67

**МОРОЗОВ Дмитрий Валерьевич** – доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 394-41-34, e-mail: dvmorozov@inbox.ru

**НЕМОВ Сергей Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. e-mail: nemov\_s@mail.ru

**НЕСТЕРОВА Елена Ивановна** – заведующий кафедрой прецизионных технологий и сертификации киновидеотехники Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения, кандидат технических наук, доцент.

191119, Санкт-Петербург, ул. Правды, д. 13. Тел. (812) 315-64-54, e-mail: nesterovaei@rambler.ru

**ОСАДЧИЙ Александр Иванович** – директор ЛО ЦНИИС, доктор технических наук, профессор.

196128, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, д. 11. Тел.(812) 369-38-67

**ПОРУБАЕВ Филипп Викторович** – студент физико-технического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812)465-98-72, e-mail: porphil@mail.ru

**ПОРШНЕВ Сергей Владимирович** – заведующий кафедрой автоматики и информационных технологий Уральского федерального университета, доктор технических наук, профессор.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32. Тел. (343) 375-37-53, e-mail: sergey\_porshnev@mail.ru

**ПЩЕЛКО Николай Сергеевич** – и.о. заведующего кафедрой общей и технической физики Санкт-Петербургского государственного горного института (технического университета), кандидат технических наук, доцент, докторант.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2. Тел.328-82-06, e-mail: nikolsp@mail.ru

**САФРЫГИНА Екатерина Михайловна** – аспирант кафедры автоматизированных систем управления ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. (343) 375-41-45

**СИМОНОВА Лариса Анатольевна** – профессор кафедры автоматизации и информационных технологий Камской государственной инженерно-экономической академии, доктор технических наук.

423810, г. Набережные Челны, пр. Мира, д. 68/19. Тел. (8552) 58-96-17

**СО Ирина Александровна** – аспирант кафедры информационных измерительных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 22. Тел. (812) 297-60-01, e-mail: Irene\_So@mail.ru

**ТАРХАНОВ Виктор Иванович** – профессор кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук, доцент.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-63-14, e-mail: vtarkhanov@mail.ru

**ТАРХОВ Дмитрий Альбертович** – профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, доцент.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 593-55-12, e-mail: dtarkhov@gmail.com

**ТОПАЖ Александр Григорьевич** – научный сотрудник лаборатории математического моделирования агроэкосистем Санкт-Петербургского агрофизического института, доктор технических наук.

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14

**ТРИФОНОВ Петр Владимирович** – доцент кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-06-29, e-mail: petert@dcn.ftk.spbstu.ru

**ТЮРИН Сергей Феофентович** – профессор кафедры автоматики и телемеханики Пермского государственного технического университета, доктор технических наук, Заслуженный изобретатель РФ.

614112, г. Пермь, ул. Гремячий Лог, д. 1

**ФИЛАТОВ Игорь Николаевич** – заведующий кафедрой управления качеством Северо-Западного государственного технического университета, кандидат технических наук

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5. Тел. (812) 335-26-00, e-mail: filin.05@mail.ru

**ФРАНЦ Владимир Александрович** – студент кафедры радиоэлектронных систем Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса.

346500, г. Шахты, ул. Шевченко, д. 147. Тел. (8636) 22-54-91, e-mail: degobyt@gmail.com

**ХАНИН Самуил Давидович** – заведующий кафедрой физической электроники Российского государственного педагогического университета имени А.И. Герцена, заведующий отделом физики неупорядоченных и низкоразмерных систем НИИ физики, доктор физико-математических наук, профессор.

191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 48. E-mail: sinklit@mail.ru

**ХВОРОВА Любовь Анатольевна** – доцент кафедры теоретической кибернетики и прикладной математики Алтайского государственного университета, кандидат технических наук.

656049, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 61. Тел. (3852) 367-018, e-mail: hla@math.asu.ru

**ЦУПРИКОВ Александр Александрович** – доцент кафедры информатики Кубанского государственного технологического университета, кандидат технических наук.

350040, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2. Тел. (861) 255-03-91, e-mail: tsouprikov@mail.ru

**ЧЕРЕДНИЧЕНКО Владимир Григорьевич** – старший преподаватель кафедры физики Кубанского государственного технологического университета.

350040, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2. Тел. (861) 255-03-91

**ЭБАНГА Арманд Акуму** – аспирант кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-63-14, e-mail: mikano.78@mail.ru

## **АННОТАЦИИ**

### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

Гребенкин М.К., Поршнева С.В. ВЛИЯНИЕ АКТИВНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СЕТИ ИНТЕРНЕТ НА СВОЙСТВА МУЛЬТИСЕРВИСНОГО ТРАФИКА.

В рамках жидкостной модели сетевого трафика рассмотрено влияние параметров распределения вероятностей запросов пользователей на самоподобные свойства сетевого трафика в режиме обеспечения гарантированной скорости доступа к сети Интернет.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЖИДКОСТНАЯ МОДЕЛЬ. СЕТЕВОЙ ТРАФИК. САМОПОДОБИЕ.

Аксенов К.А., Антонова А.С., Спицина И.А. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ.

Рассмотрена автоматизация процесса анализа и синтеза имитационных моделей организационно-технических систем с помощью информационной технологии интеллектуальных агентов.

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ. МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. РЕИНЖИНИРИНГ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ.

Трифонов П.В. ПРИМЕНЕНИЕ СПИСОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ.

Рассмотрена проблема автоматической классификации текстовых документов. Показано, что благодаря использованию помехоустойчивого кодирования можно добиться повышения точности классификации. Предложены новые алгоритмы обучения и классификации и проведен анализ их эффективности.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КАТЕГОРИЗАЦИЯ. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ КОДИРОВАНИЕ.

Тюрин С.Ф., Греков А.В., Громов О.А. ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПОЛНЫЙ ТОЛЕРАНТНЫЙ ЭЛЕМЕНТ.

Изучены особенности сохранения логических функций при отказах. Показано, что для сохранения констант при отказах и сбоях необходимо троирование – мажоритирование. Проанализированы функционально-полные толерантные (ФПТ) элементы, обеспечивающие сохранение функциональной полноты при заданной модели отказов. Предложен и проанализирован базисный элемент ФПТ+ с функцией 2ИЛИ-НЕ на КМОП-транзисторах, сохраняющий эту функцию при однократных константных отказах.

НАДЕЖНОСТЬ. ОТКАЗЫ. ТРОИРОВАНИЕ. МАЖОРИТИРОВАНИЕ. БАЗИСНАЯ ФУНКЦИЯ. ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПОЛНЫЙ ТОЛЕРАНТНЫЙ ЭЛЕМЕНТ.

Марчук В.И., Воронин В.В., Франц В.А. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ СИГНАЛОВ.

Описан новый метод реконструкции изображения. Предлагаемый подход использует модифицированный метод exemplar-based methods (ЕВМ). Модификация позволяет выбирать субоптимальную адаптивную форму и размер блока, для которого находятся похожие блоки, количество которых увеличивается с помощью поворота найденных похожих блоков. Показано, что эффективность восстановления изображения зависит от выбора размера блока для метода ЕВМ. Предложенный подход позволяет получить меньшую ошибку восстановления, чем традиционный метод, а также другие известные методы восстановления изображений.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ. МЕТОД ЕВМ. INPAINTING. АДАПТИВНЫЙ РАЗМЕР БЛОКА.



Каримов Т.Н., Симонова Л.А. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ.

Рассмотрены проблемы оперативного управления товаропотоками предприятия. Изложены основные проблемы применительно к современным информационным логистическим транспортным системам.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИМИЗАЦИЯ. ТЕОРИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ.

Аксенов К.А. Сафрыгина Е.М., Доросинский Л.Г. РАСШИРЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ.

Описаны технологии интеграции аппарата нечеткой логики и программного комплекса поддержки принятия решений VPsim4, а также приведены результаты работы моделей, реализованных с применением средств нечеткого анализа и управления.

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ. НЕЧЕТКИЕ КОНТРОЛЛЕРЫ. НЕЧЕТКИЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ.

Денисова А.А., Филатов И.Н. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЫНОЧНОГО МЕХАНИЗМА НА ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРОДУКЦИИ.

Рассмотрены проблемы влияния рыночного механизма на конкурентоспособность продукции и на ее качество. Изложены основные проблемы обеспечения качества продукции на различных стадиях ее жизненного цикла.

УПРАВЛЕНИЕ. УСТОЙЧИВОСТЬ. КАЧЕСТВО. КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Нестерова Е.И. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫХОДНЫХ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.

Сформулирована системная структура выходных квалиметрических характеристик кинематографических систем, определяющих качество услуг по кинопоказу. Показано, что структура имеет иерархическое строение, включает частные, обобщенные характеристики и интегральные критерии. В основе оценивания квалиметрических характеристик лежат субъективные психофизические и функциональные экспертизы. Разработанная структура характеристик является основой обобщенного алгоритма субъективной квалиметрической оценки качества услуг по кинопоказу.

КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ. ЭКСПЕРТНАЯ КВАЛИМЕТРИЯ.

Кузнецова О.К., Мейер М.В., Осадчий А.И. МЕТОДИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИКОЙ ПРЕДПРИЯТИЯ СВЯЗИ.

Изучены вопросы системного подхода к управлению и внедрению научно-исследовательских разработок. В современных условиях быстрого изменения внешних и внутренних факторов деятельности предприятий связи важную роль играет научное обоснование управленческих решений.

УПРАВЛЕНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ. ПРЕДПРИЯТИЕ. СВЯЗЬ. ЭКОНОМИКА.

Мадорская Ю.М. ФОРМИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСУП.

Изучены проблемы построения метода формирования оценки изменений. Приведено описание комплекса взаимосвязанных задач и решений, составляющих основу метода. Предлагаемые решения позволяют сократить сроки и расходы на внедрение и сопровождение программного обеспечения больших автоматизированных систем, а также сократить объем ошибок проектирования.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ. ТРАССИРОВКА. ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ. ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ ОШИБОК. ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Бородин А.М., Поршнева С.В. О ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ПОСТРОЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИНДЕКСОВ ОСНОВНОЙ ПАМЯТИ В OLAP-СИСТЕМАХ.

Рассмотрены вопросы применения параллельных вычислений при построении индексирующих структур основной памяти в OLAP-системах на рабочих станциях. Предложена технология применения параллельной загрузки методом вставки данных вместо традиционных алгоритмов массовой загрузки для ускорения построения индекса.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. МНОГОМЕРНЫЕ ДАННЫЕ. OLAP-СИСТЕМЫ. ИНДЕКСИРОВАНИЕ.

Курочкин Л.М. ВОПРОСЫ ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САД СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ.

Изучены проблемы построения информационной среды оперативного доступа к данным о технологических возможностях предприятий машиностроительного профиля. Рассмотрены варианты построения структурной схемы, информационного и функционального обеспечения информационной среды.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ. ПЕРЕХОДЫ. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЕТЕНЦИИ. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. КООПЕРАЦИЯ.

Арсеньев Д.Г., Иванов В.М., Берковский Н.А. НАВИГАЦИЯ ПО РАССТОЯНИЯМ ДО ТОЧЕЧНЫХ ОРИЕНТИРОВ АДАПТИВНЫМ МЕТОДОМ СУЩЕСТВЕННОЙ ВЫБОРКИ.

Рассмотрено применение разработанного авторами адаптивного метода интегрирования к задаче навигации по расстояниям до точечных ориентиров. Проведено сравнение предлагаемого метода с методом, обычно используемым для решения аналогичных задач.

АДАПТИВНОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ. МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО. СУЩЕСТВЕННАЯ ВЫБОРКА. БАЙЕСОВСКАЯ ОЦЕНКА.

Ильясов Б.Г., Дегтярева И.В., Макарова Е.А., Карташева Т.А. ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЫНКОВ БЛАГ И ДЕНЕГ.

Представлены когнитивная и динамические модели функционирования макроэкономической системы с учетом рынков благ и денег. Проведены экспериментальные исследования динамики формирования финансовых потоков секторами экономики под влиянием регулирующих воздействий со стороны государства.

МАКРОЭКОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. КРУГООБОРОТ ПОТОКОВ. РЫНОК БЛАГ. РЫНОК ДЕНЕГ. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Нестерова Е.И. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ ПРИ РЕШЕНИИ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.

Приведены результаты особенностей применения интегральных квалиметрических критериев в кинематографических системах. В качестве основной модели, позволяющей оценивать результаты преобразований характеристик в кинематографических системах, предложено использовать статистическую модель, описываемую характеристическими функциями, и на ее основе формировать интегродифференциальный критерий. Рассмотрены преимущества предложенного критерия.

КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ. ЭКСПЕРТНАЯ КВАЛИМЕТРИЯ.

Хворова Л.А., Топаж А.Г. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ АГРОЭКОСИСТЕМ И ИХ АДАПТАЦИЯ К КОНКРЕТНЫМ УСЛОВИЯМ.

Рассмотрены методы и алгоритм структурно-параметрической идентификации моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Приведена реализация алгоритма для адаптации модели EPIC к условиям Западной Сибири.

ПРОДУКЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ. МОДЕЛЬ. РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ПОСЕВА. АДАПТАЦИЯ.



Матвеев В.А. КОНУСНАЯ ОПТИМАЛЬНОСТЬ В ИГРОВОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ С ВЕКТОРНЫМИ ВЫИГРЫШАМИ.

Изучена динамическая линейно-квадратичная игровая задача двух лиц с векторным  $m_1(m_2)$ -компонентным выигрышем у первого (второго) игрока. В качестве решения рассмотрены конусные равновесия. Предложено уточнение равновесной ситуации на основе экспертных оценок. Динамическая игровая задача с векторными выигрышами сводится к бескоалиционной дифференциальной игре двух лиц. Равновесное решение в последней задаче изучено по рецептам динамического программирования Беллмана. Приведен модельный пример.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ИГРОВАЯ ЗАДАЧА. ВЕКТОРНЫЙ ВЫИГРЫШ. ОПТИМАЛЬНОСТЬ ПО КОНУСУ.

Ляшенко А.Л., Золотов О.И. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С ПОДВИЖНЫМ ИСТОЧНИКОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ.

Рассмотрены проблемы анализа систем с распределенными параметрами с подвижным источником воздействия. Изложена методика составления математической модели распределенного объекта управления.

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ. ПОДВИЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Со И.А., Малыгина Г.Ф. ИЗМЕРЕНИЕ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЯ.

Предложен новый подход к измерению цветовых различий, применяемый непосредственно в неравноконтрастном пространстве и отличающийся отсутствием преобразования этого пространства в равноконтрастное. В рамках нового подхода предложены прикладные методы измерения цветовых различий, основанные на модели цветовосприятия зрительной системы человека и учитывающие неравномерность цветового пространства.

ЦВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ. ПОРОГ ЦВЕТОРАЗЛИЧИЯ. МОДЕЛЬ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЯ. АНИЗОТРОПИЯ. НЕРАВНОМЕРНОСТЬ.

Чередниченко В.Г., Цуприков А.А. ВОЗНИКНОВЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЕ.

Рассмотрены вопросы возникновения и моделирования вибраций, возникающих в буровой колонне при ее вращении. Разработана математическая модель автоколебаний, выполнено компьютерное моделирование, получены и проанализированы графики крутильных автоколебаний.

БУРОВАЯ КОЛОННА. ВИБРАЦИЯ. КРУТИЛЬНЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Аксенов К.А. Ван Кай ЗАДАЧА СВЕРТКИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ.

Изучена задача уменьшения размерности имитационной мультиагентной модели организационно-технической системы.

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ. МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ. БИЗНЕС-ПРОЦЕСС. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Васильев А.Н., Порубаев Ф.В., Тархов Д.А. НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПЕРЕНОСА.

На основе нейросетевой методологии предложен подход к решению некорректной задачи построения температурного поля по приближенно известным данным точечных измерений. Приведены результаты вычислений. Указаны преимущества нейросетевого подхода и возможные обобщения.

УРАВНЕНИЯ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ. НЕКОРРЕКТНЫЕ ЗАДАЧИ. НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ. ОБУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ. ФУНКЦИОНАЛ ОШИБКИ. ГЛОБАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ.

Антонов В.И., Загайнов А.И., Коваленко А.Н., Ву ван Куанг АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ЭНТРОПИЙНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА КАРДИОРИТМА.

Представлен новый программный продукт исследования фрактальных компонент variability сердечного ритма. Сделана попытка обобщить наиболее значимые фрактальные показатели, проведя исследования фрактальных компонент в режиме реального времени.

ХОЛТЕРОВСКОЕ МОНИТОРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ. ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ. ИЕРАРХИЧНОСТЬ И САМОПОДОБИЕ. ВОССТАНОВЛЕННЫЙ АТТРАКТОР. КОРРЕЛЯЦИОННАЯ РАЗМЕРНОСТЬ. КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ. СТАРШИЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЛЯПУНОВА. НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА СЕРДЕЧНОГО РИТМА.

Антонов В.Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЯТОРА ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ.

Приведены материалы по разработке конструкции и проведены исследования математической модели распределенного регулятора прямого действия. Получена зависимость, связывающая геометрические размеры регулятора с тепловым потоком.

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ. РЕГУЛЯТОРЫ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ.

Бостонов О.Х. СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ.

Описан метод интеграции информационных систем на основе метода полисемической декомпозиции. Представлено инструментальное средство семиотического моделирования для интеграции информационных систем.

ИНТЕГРАЦИЯ. ЦЕЛОСТНОСТЬ. CASE-СРЕДСТВА.

Коротков А.С., Морозов Д.В. НАНОЭЛЕКТРОНИКА – ОСНОВА КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОТЕХНИКИ.

Обобщены результаты теоретических и практических исследований по разработке нанoeлектронной компонентной базы преимущественно для устройств радиосвязи. Приведены краткие сведения о современных устройствах радиосвязи. Рассмотрены вопросы построения высокочастотных и низкочастотных аналоговых устройств и аналого-цифровых преобразователей.

РАДИОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО. МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ. СМЕСИТЕЛЬ. ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ. АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ.

Пщелко Н.С., Ханин С.Д., Немов С.А. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР ОКСИДНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ.

Представлен ряд экспериментальных методик неразрушающего контроля качества оксидных конденсаторов на основе использования электрофизических параметров. Предложены методы повышения временной стабильности свойств оксидных конденсаторов.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ. КОНДЕНСАТОРЫ. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

Эбанга А., Тарханов В.И. УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ФЕРРИТОВЫХ КОЛЕЦ С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ КАТУШЕК.

Описаны устройства, в основе работы которых лежит использование ферритовых колец с катушками различного типа. Показано, что геометрия и способ намотки катушек на ферритовое кольцо задают характер распределения в нем переменных магнитных полей и определяют характер выполняемых устройством операций.

ФЕРРИТОВОЕ КОЛЬЦО. ГРАДИЕНТНАЯ КАТУШКА. ЭХО-ПРОЦЕССОР. КОНСТРУКТИВНАЯ И ДЕСТРУКТИВНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ. ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР. ВИТАЯ ПАРА.

Купцов В.Д., Кянджециан Р.А., Кателевский В.Я., Валюхов В.П. СВЕТОРАССЕЯНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ГАЗОАНАЛИЗАТОРАХ НА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЯДРАХ КОНДЕНСАЦИИ.

Изложена теория рассеяния света малыми частицами аэрозолей, размеры которых соизмеримы с длиной волны оптического излучения (теория Ми), на основе которой впервые проведены расчеты светорассеяния аэрозольными частицами, образованными на молекулярных ядрах конденсации. Результаты расчетов позволили оптимизировать конструкции фотометров газоанализаторов на основе эффекта молекулярных ядер конденсации.

СВЕТОРАССЕЯНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЯДРА КОНДЕНСАЦИИ. АМПЛИТУДНАЯ МАТРИЦА РАССЕЯНИЯ. ТЕОРИЯ МИ. НЕФЕЛОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД.

Маркелова А.В. УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.

Рассмотрена задача управления процессом формирования основной образовательной программы. Описаны достоинства и недостатки федеральных государственных образовательных стандартов третьего поколения, также изучен международный опыт. Даны рекомендации разработчикам образовательных программ и предложен подход к оптимизации процесса с помощью системы поддержки принятия решений.

УПРАВЛЕНИЕ. ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА. ФЕДЕРАЛЬНЫЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ. ОПТИМИЗАЦИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА. СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.



## ANNOTATION

### KEYWORDS

Grebenkin M.K., Porshnev S.V. INFLUENCE OF INTERNET USERS ACTIVITY PATTERNS ON SELF-SIMILAR PROPERTIES OF THE TRAFFIC.

In terms of fluid model of network traffic the influence of users requests probability distribution parameters on self-similar properties of Internet traffic in rate-limit mode is considered.

SIMULATION. FLUID MODEL. TRAFFIC. SELF-SIMILARITY.

Aksyonov K.A., Antonova A.S., Spitsina I.A. ANALYSIS AND SYNTHESIS PROCESSES OF TRANSFORMATION OF RESOURCE-BASED SIMULATIONS AND INTELLIGENT AGENTS.

In this work is considered the process automation of analysis and synthesis of multi-agent simulation models of organizational and technical systems on the basis of information technology intelligent agent.

ANALYSIS AND SYNTHESIS SYSTEMS. MULTI-AGENT SIMULATION SYSTEMS. BUSINESS PROCESS REENGINEERING.

Trifonov P.V. APPLICATION OF LIST DECODING TO THE PROBLEM OF AUTOMATIC TEXT CATEGORIZATION.

The problem of automatic text document categorization is considered. It is shown that the application of error correcting codes enables one to improve the categorization precision. Novel learning and categorization algorithms are proposed, and their efficiency analysis is presented.

AUTOMATIC CATEGORIZATION. ERROR-CORRECTING CODES.

Tyurin S.F., Grekov A.V., Gromov O.A. FUNCTIONALLY-COMPLETE TOLERANT ELEMENT.

Singularities of saving of logic functions are considered at failures and it is shown that for saving of constants at failures and malfunctions it is necessary to use triple redundancy – majoritation. By the authors offered functionally complete tolerant (FCT) elements are analyzed which provide saving of the functional completeness at the given failure pattern. Basis element FCT+ with function 2OR-NOT on CMOS transistors saving this function at the single-valued constant failures is offered and is analyzed.

DEPENDABILITY. FAILURES. TRIPLE REDUNDANCY. MAJORITATION. BASIS FUNCTION. FUNCTIONALLY-COMPLETE TOLERANT ELEMENT.

Marchuk V.I., Voronin V.V., Franz V.A. MODIFIED APPROACH FOR IMAGE RECONSTRUCTION OF TWO DIMENSIONAL SIGNALS.

New approach for image reconstruction is described in this paper. The approach uses modified exemplar-based method (EBM). This modification let us choose suboptimal adaptive shape and block size, for which is found similar blocks, their number increase with rotation of found similar blocks. In this paper have shown image reconstruction efficiency depends on block size for EBM. This approach lets us take less reconstruction error than original method and another known image reconstruction methods. It was showed efficiency of new approach with several examples.

IMAGE RECONSTRUCTION. RESTRICTED OF A PRIORI INFORMATION. EXTRAPOLATION.

Karimov T.N., Simonova L.A. INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR OPERATIONAL MANAGEMENT OF TRAFFIC FLOWS.

The problems of operational management sourcing company. The basic problem with respect to modern information logistics transportation systems.

MATHEMATICAL MODELING. INFORMATION SYSTEMS. OPTIMIZATION. THEORY OF TRANSPORT FLOWS.

Aksyonov K.A., Safrygina E.M., Dorosinskiy L.G. EXTENSION OF INTELLECTUAL DECISION-MAKING SUPPORT TOOLS AND SIMULATION FOR FUZZY LOGIC.

Integration technologies of the fuzzy logic mechanism and a program complex of decision-making support BPsim4 are described, and also resulted some work results of the models realized with means of the fuzzy analysis and regulation DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM. FUZZY CONTROLLERS. FUZZY MULTICRITERION ANALYSIS.

Denisova A.A., Filatov I.N. ANALYSIS OF THE MARKET INFLUENCE ON RAISE COMPETITIVENESS OF THE PRODUCTS.

In this article the market influence on competitiveness and quality of the products and services is described. There are also basic problems of the quality maintenance on different stages of the product life cycle.

MANAGEMENT. STABILITY. QUALITY. COMPETITIVENESS. MODELLING. OPTIMIZATION.

Nesterova E.I. SYSTEM STRUCTURE FORMING OF OUTPUT QUALIMETRICAL CHARACTERISTICS OF CINEMATOGRAFIC SYSTEM.

A system structure of the output qualitative characteristics of film systems that determine the quality of services for movie screenings is formulated in this article. It is shown that this structure has a hierarchical structure, including private, generalized characteristics and integral criteria. It is shown that the basis for evaluation of qualitative characteristics are subjective psychophysical and functional expertise. Shown that the designed structure is the basis of a generalized algorithm for qualitative estimations of subjective quality of cinema.

CINEMATOGRAPHIC SYSTEMS. QUALIMETRICAL CHARACTERISTICS. INTEGRAL CRITERIA. EXPERT QUALIMETRY.

Kuznetsova O.K., Meyer M.V., Osadchy A.I. METHODOLOGICAL TOOLS FOR ECONOMIC MANAGEMENT OF COMMUNICATION ENTERPRISE.

The article arise the issues of system approach to working out and application of research and development scientific products. In modern framework of rapid changes of internal and external factors of telecommunication enterprise functioning scientific ground of management solutions is of a big value. A methodic support of management of economy elements including human, technical, technological, informational and financial resources promote grounded and weighted management solutions.

MANAGEMENT. RESEARCH. ENTERPRISE. TELECOMMUNICATION. ECONOMY.

Madorskaya J.M. FORMATION OF EVALUATION SOFTWARE CHANGES IN MIS.

This paper presents a method for change estimation during MIS development and maintenance process. A set of interconnected tasks and solutions forming the core of the proposed method is discussed. Proposed solutions allow for decreasing costs related to roll-out and maintenance of large management information systems software.

REQUIREMENTS FORMALIZATION. CHANGE TRACKING. CHANGE ESTIMATION. SOFTWARE ENGINEERING TECHNOLOGY. ERROR CLASSIFICATION. ONTOLOGICAL MODEL.

Borodin A.M. Porshnev S.V. ON PARALLEL CONSTRUCTION OF MULTIDIMENSIONAL IN-MEMORY INDICES IN OLAP SYSTEMS.

This paper overviews application of parallel computing to build in-memory indexing structure of workstation-based OLAP system. Proposed method is based on parallelizing index inserts instead of using bulk-loading algorithms. This approach allows reducing start-up time of analytical calculations with the price of insignificant calculation slowdown.

PARALLEL COMPUTING. MULTIDIMENSIONAL DATA. OLAP SYSTEMS. INDEXING.

Kurochkin L.M. INTEGRATION OF INFORMATIONAL SUPPORT OF THE ENTERPRISE CAD SYSTEMS.

Within the frames of the present work we study the problems of construction of the information environment for the real time access to the records of the technological capabilities of machine-building enterprises and consider variants of development of a structural scheme, of informational and functional support of the information environment.

TECHNOLOGICAL PROCESS. TECHNOLOGICAL OPERATIONS. TRANSITIONS. INFORMATION SYSTEM. TECHNOLOGICAL CAPACITY. FUNCTIONAL SUPPORT. COOPERATION.



Arseniev D.G., Ivanov V.M., Berkovskiy N.A. APPLYING THE ADAPTIVE IMPORTANCE SAMPLING METHOD TO THE TRILATERATION PROBLEM.

The paper are devoted the adaptive method devised by the authors as applied to the trilateration problem in 2D-space. The method are compared with the important sampling method, that is usually used for analogous problems solving.

ADAPTIVE INTEGRATION. MONTE-CARLO METHOD. TRILATERATION. BAYESIAN ESTIMATE.

Ilyasov B.G., Degtyareva I.V., Makarova E.A., Kartasheva T.A. DYNAMIC SIMULATION OF NONEQUILIBRIUM PROCESSES OF INTERACTION OF GOODS AND MONEY MARKETS.

Cognitive and dynamic models of macroeconomic system functioning process considering goods and money markets are presented in the article. The experimental investigations of the dynamics of financial flows formation by economic sectors under the influence of regulatory control from the direction of Government were made.

MACROECONOMIC SYSTEM. FLOWS TURNOVER. GOODS MARKET. MONEY MARKET. DYNAMIC MODEL.

Nesterova E.I. THE USE OF INTEGRAL CRITERIA FOR SOLVING QUALIMETRICAL PROBLEMS.

The results of the analysis of features of the integral qualitative criteria in the cinematography systems are considered in this article. As a basic model that allows to evaluate the results of transformation characteristics in a cinema systems is proposed to use a statistical model, described by the characteristic functions and use it to create an integral criterion. The benefits of the proposed criterion are considered.

CINEMATOGRAPHIC SYSTEMS. INTEGRAL QUALIMETRICAL CRITERIA. EXPERT QUALIMETRY.

Khvorova L.A., Topaj A.G. BUILDING MODELS OF AGRO-ECOSYSTEMS AND THEIR ADAPTATION TO SPECIFIC CONDITIONS.

The article deals with methods and algorithms of structural-parametric identification of models of the production process of agricultural crops. Shows the implementation of the algorithm to adapt the model EPIC to the conditions of Western Siberia.

PRODUCTION PROCESSES. STRUCTURAL-PARAMETRIC IDENTIFICATION MODEL. RADIATION REGIME OF SOWING. ADAPTATION.

Matveev V.A. CONE OPTIMALITY IN GAME DYNAMIC PROBLEM WITH EVERY PLAYER' VECTOR PAYOFFS.

The dynamic linear – quadratic two player' game problem with vector  $m_1$  ( $m_2$ )-component payoff for the first (the second) player is studied. As a problem's decision the cone equilibrium is considered. As a rule, there are a lot of such situations. In article an equilibrium situation refinement on the expert estimation basis is offered. The dynamic game problem with vector payoffs is reduced to a noncooperative differential two person' game. The equilibrium decision in last problem is studied under recipes of the Bellman's dynamic programming. The modeling example is presented.

DYNAMIC GAME PROBLEM. VECTOR PAYOFF. CONE OPTIMALITY.

Lyashenko A.L., Zolotov O.I. MATHEMATICAL MODELLING OF DISTRIBUTED OBJECT OF CONTROL WITH MOBILE SOURCE OF INFLUENCE.

The article describes problems of analysis of systems with distributed parameters with a mobile source of influence, and methods of creating mathematical models of distributed object of control are given.

CONTROL. SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS. MOBILE SOURCES Of INFLUENCE. MODELLING.

So I.A., Malykhina G.F. MEASURING COLOR DIFFERENCES BASED ON THE COLOR PERCEPTION MODEL.

A new approach to measuring color differences is proposed. The new approach is used directly in the non-uniform color space wherein there is no transformation of this space to a uniform color space. By using said approach new applied methods for measuring color differences based on the new color perception model are presented. The methods allow for influence of non-uniformity of the standard color space.

COLOR MEASUREMENT. COLOR THRESHOLD. COLOR PERCEPTION MODEL. ANISOTROPY. NON-UNIFORMITY.

Cherednichenko V.G., Tsouprikov A.A. GENESIS OF TWINER AUTOOSCILLATIONS IN BORING PILLAR.

Questions of genesis and simulations of boring pillars autooscillations are considered by its rotation. Mathematical model of autooscillations is developed, computer simulations is done, diagrams of twiner autooscillations are resumed and analysed.

BORING PILLAR. FLUTTER. TWINER AUTOOSCILLATIONS. MODELLING.

Aksyonov K.A., Wang Kai. THE TRANSFORMATION TASK OF SIMULATION MULTI-AGENT MODEL OF RESOURCES CONVERSION PROCESSES.

In this work is considered the task of organizational and technical systems model transformation, which allows reducing time of experiment and making the model by less requiring to computer resources.

ANALYSIS AND SYNTHESIS SYSTEMS. MULTI-AGENT SYSTEMS. BUSINESS PROCESS. SIMULATION.

Vasilyev A.N., Porubayev F.V., Tarkhov D.A. NEURAL NETWORKS APPROACH TO THE SOLUTION OF INCORRECT HEAT TRANSFER PROBLEMS.

An approach to the solution of incorrect problem of temperature field evaluation according to approximately known point measurement data is offered on the basis of neural network methodology. Results of neurocomputing are given. Advantages of neural network approach and some possible generalizations are mentioned.

PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS. INCORRECT PROBLEMS. NEURAL NETWORK MODEL. ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TRAINING. ERROR FUNCTIONAL. GLOBAL OPTIMIZATION.

Antonov V.I., Zagaynov A.I., Kovalenko A.N., Vu van Quang. HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX OF DYNAMIC-ENTROPY MONITORING OF HEART RATE.

This paper presents a new software product study of fractal component of heart rate variability. As is known, the hierarchical and structural self-similarity of restored attractors biomedical signals allow us to consider their fractal properties. Currently, the authors examine these characteristic parameters, using either the-shelf software tools, either by writing your own code. In the present paper attempts to summarize the most important fractal indicators, leading the study of fractal components in real time mode.

HOLTER ECG MONITORING. HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX. FRACTAL ANALYSIS OF TIME SERIES. HIERARCHY AND SELF-SIMILARITY. DYNAMIC STABILITY. RESTORED ATTRACTOR. CORRELATION DIMENSION. CORRELATION ENTROPY. THE SENIOR LYAPUNOV EXPONENT. NONLINEAR DYNAMICS OF HEART RHYTHM.

Antonov V.F. DYNAMIC PERFORMANCE CONTROL OF DIRECT ACTION.

The article contains material on design development and research of mathematical model of the controller of direct action. The dependence of linking the geometric dimensions of the controller to heat flow.

THERMAL PROCESSES. TEMPERATURE FIELD. SELF-OPERATED REGULATORS.

Bostonov O.H. SEMIOTIC MODELING WORKBENCHES FOR INFORMATION SYSTEM INTEGRATION.

Described information systems integration method, based on polysemy decomposition method. Semiotic modeling workbench for information systems integration is represented.

INTEGRATION. CONSISTENCY. CASE.

Korotkov A.S., Morozov D.V. NANOELECTRONICS AS A COMPONENT BASE OF MODERN RADIOENGINEERING.

The research and practical work results on the development of Nanoelectronics component base are summarized primarily for radio communication devices. Questions of high and low frequency analog circuit design are discussed. Design of analog-digital converters is presented.

RECEIVER. LOW-NOISE AMPLIFIER. MIXER. LOW-PASS FILTER. ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER.

Pshchelko N.S., Khanin S.D., Nemov S.A. PHYSICAL BASIS FOR METHODS OF DIAGNOSTICS AND IMPROVEMENT OF METALL-DIELECTRIC STRUCTURES OF OXIDE CAPACITORS.

The paper presents a number of experimental techniques of non-destructive control of quality of oxide capacitors which are based on electrophysical parameters. Some methods for capacitors time stability improvement are proposed.

NONDESTRUCTIVE TESTING. CAPACITORS. DIELECTRIC LOSSES. ELECTRIC FIELD.



Ebanga A., Tarkhanov V.I. DEVICES BASED ON FERRITE RINGS WITH DIFFERENT COILS GEOMETRY.

Some devices based on ferrite rings with different kinds of coils are described. It is shown that the coil's geometry and the kind of winding define patterns of RF magnetic field patterns inside the ring and the way it can operate inside the device.

FERRITE RING. GRADIENT COIL. ECHO-PROCESSOR. CONSTRUCTIVE and DESTRUCTIVE INTERFERENCE. BROADBAND TRANSFORMER. TWISTED-PAIR CABLE.

Kuptsov V.D., Kjandzhetsian R.A., Katelevski V.J, Valjuhov V.P. LIGHT SCATTERING BY AEROSOL PARTICLES IN GAS ANALYZERS BASED ON MOLECULAR CONDENSATION NUCLEUS EFFECT.

The theory of light scattering by small aerosol particles, which dimension is commensurable with optical radiation wave-length, is described (Mie's theory). For the first time the calculations of light scattering by aerosol particles are generated on molecular condensation nucleus are carried out. The results of calculations permits to optimize design of gas analyzers based on molecular condensation nucleus effect photometers.

LIGHT SCATTERING BY AEROSOL PARTICLES. MOLECULAR CONDENSATION NUCLEUS. AMPLITUDE SCATTERING MATRIX. MIE'S THEORY. NEPHELOMETRIC METHOD.

Markelova A.V. MANAGEMENT OF THE EDUCATIONAL PROGRAM USING DECISION SUPPORT SYSTEM.

This article addresses problem of management of the main educational program process formation. The advantages and disadvantages of federal state educational standards, as well as international experience are described. As a result, it is given recommendations to the developers of educational programs and an approach to the process optimization using decision support system is proposed.

MANAGEMENT. EDUCATIONAL PROGRAM. FEDERAL STATE EDUCATIONAL STANDARDS. EDUCATIONAL PROCESS OPTIMIZATION. DECISION SUPPORT SYSTEM.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГУ**

**№ 1 (115) 2011**

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция журнала

д.э.н., профессор, канд. техн. наук *А.В. Бабкин* – научный редактор

*Е.А. Калинина* – литературный редактор, корректор

*Т.А. Борисова* – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции 552-62-16, 297-18-21

E-mail: [infocom@spbstu.ru](mailto: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 24.02.2011. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,64. Уч.-изд. л. 24,64. 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.