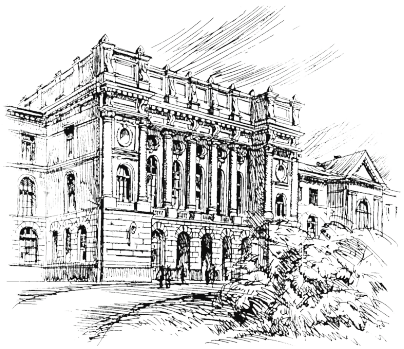
5(108)/2010



Научно-технические ведомости СПбГПУ

ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

Министерство образования и науки
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

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

СЕРИЯ "ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ"

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор – зам. председателя;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор – зам. председателя;
Болдырев Ю.Я., д-р техн. наук, профессор;
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.

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

Проблемы передачи и обработки информации

Благов Д.С., Волвенко С.В. *Повышение скорости передачи информации в метеорных системах связи путем использования сигналов переменной длительности* 7

Прокошев В.Г., Рожков М.М., Шамин П.Ю. *Проблема автоматического распознавания лиц с одним эталонным изображением* 13

Блеканов И.С., Бондаренко Д.С. *Оценка эффективности методов поиска тематических сообществ в веб-пространстве* 18

Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства

Гельгор А.Л., Попов Е.А. *Оптимизация формы огибающей многокомпонентных сигналов при наличии ограничений на пик-фактор и коэффициент корреляции* 25

Иванов М.В. *Анализ причин возникновения внутрисистемных помех в обратном канале в сетях WCDMA и методы их устранения* 30

Останин С.А., Шайдук А.М., Семёнов Г.А. *Границы применимости спектральных методов обнаружения сигналов малой длительности* 35

Черноярoв О.В., Розанов А.Е. *Квазиоптимальные оценки времени прихода и дисперсии случайного импульсного сигнала с произвольной модулирующей функцией* 40

Системный анализ и управление

Акчурин А.Д., Юсупов К.М. *Система управления ионозонда «Циклон»* 49

Матвеев В.А. *Исследование конусной оптимальности в многокритериальной динамической задаче* 56

Тазетдинов А.Д. *О некоторых характеристиках математической модели процесса понимания информации* 62

Шмарин И.А. *Особенности управления устойчивым развитием предприятия на основе информационных технологий* 68

Победаш П.Н. *Анализ модели инновационного развития производственного предприятия на основе операционного подхода* 71

Кулешов И.А., Фортинский А.Г., Рябченко С.В. *К вопросу о классификации структур управления сложной организационно-технической системой* 74

Ростов Н.В. *Многокритериальная оптимизация цифровых модальных регуляторов на основе прямого и косвенного зондирования* 77

Салангин А.А. *Формализация задач системного проектирования* 84

Вычислительные машины и программное обеспечение

Попов С.Г. *Методика построения оптимального репозитория схем реляционных баз данных* 91

Аникин И.В., Потапов А.С. *Программный комплекс оценки рисков информационной безопасности на основе продукционно-фреймовой модели* 98

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Романов С.В., Шанина А.С. *Опыт применения математического моделирования грунтовых оснований зданий и сооружений* 103

Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Романов С.В. *Современные технологии математического моделирования при расчетах ветрового воздействия на уникальные здания и сооружения* 109

Гетман А.Н., Кудрявцев О.Е. *Оценка финансового риска получения таможенных платежей* 115

Ханова А.А., Бондарева И.О. *Сценарный подход к анализу качества логистического обслуживания предприятия с использованием имитационной модели* 122

Алтынбаев Р.Б., Хибатуллин С.Г. *Повышение точности расчета времени выполнения авиационных работ по распределению веществ и биологических объектов* ... 130

Катасёв А.С., Газимова Д.Р. *Модель представления знаний в партнерских экспертных системах* ... 135

Зиновьев И.П., Аникин И.В. *Модель логического вывода на основе нечеткой линейной регрессии* ... 139

Малыхина Г.Ф., Со И.А. *Разработка новых моделей цветовосприятия зрительной системой человека* ... 145

Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Шанина А.С. *Современные технологии математического моделирования большепролетных металлических сооружений* ... 151

Стрелец К.И. *Численное решение уравнений турбулентной диффузии в закрученном потоке газа* ... 156

Макаров Д.А. *Применение алгоритмов слежения за движущимся объектом в системах видеонаблюдения* ... 160

Кубаев В.А. *Нестрогое вложение деревьев в приложении к поиску математических выражений* ... 166

Мызникова Б.И., Васильева Т.П. *Математическое моделирование процесса градоформирования: детерминированный подход* ... 171

Шевцов Ю.Д. *К вопросу моделирования элементов систем смазки двигателей ДЭС как линейных электрических цепей* ... 179

Приборы, информационно-измерительные системы

Кузнецов Д.А. *Автоматизация прогнозирования развития, анализа и оценки динамических моделей систем* ... 183

Шалаевский О.Н., Малыхина Г.Ф. *Онтологическая модель безопасности измерительных информационных технологий на базе общих критериев* ... 186

Электроника, технологии производства материалов электронной техники

Журавлева Л.М. *Изотоптроника как новое направление нанотехнологий для создания электронных и оптоэлектронных приборов* ... 193

Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

Стрелкова Е.В. *Идентификация авторов и персональные данные в электронно-библиотечных системах* ... 199

Тазетдинов А.Д. *О результатах применения математической модели процесса усвоения знаний в естественно-языковой обучающей системе* ... 207

Герасимова И.Б. *Когнитивные модели процесса общения двух личностей* ... 214

Кудаков А.В. *Автоматизированная система контроля и оценки знаний* ... 221

Научный семинар ... 229

Сведения об авторах ... 231

Аннотации ... 235

Contents

Problems of transfer and information processing

Blagov D.S., Volvenko S.V. *Increase of speed of information transfer in meteor-burst communication systems by use of signals of variable duration* 7

Prokoshev V.G., Rozkhov M.M., Shamin P.U. *Problem of automatic recognition of persons with one reference image* 13

Blekanov I.S., Bondarenko D.S. *The efficiency evaluation of communities search methods of the web-space* 18

Radio engineering, aerials, SHF devices

Gelgor A.L., Popov E.A. *Multi-component signals envelop optimization on peak-to-average power ratio and correlation conditions* 25

Ivanov M.V. *The analysis of the reasons of occurrence of intersystem hindrances in the return channel in networks WCDMA and methods of their elimination* 30

Ostanin S.A., Shayduk A.M. Semenov G.A. *Limitations of spectral methods for detection of short periodic signals* 35

Chernoyarov O.V., Rozanov A.E. *Quasi-optimal estimations of time delay and dispersion of random impulse with arbitrary modulation function* 40

The system analysis and management

Akchurin A.D., Usupov K.M. *«Cyclon» ionosonde controller* 49

Matveev V.A. *The research of cone optimality in multicriteria dynamical problem* 56

Tazetdinov A.D. *About some characteristics of mathematical model of process of understanding of the information* 62

Shmarin I.A. *Features of management of a sustainable development of the enterprise on the basis of information technology* 68

Pobedash P.N. *An analysis of a model of a firm innovation development by operational approach* 71

Kuleshov I.A., Fortinskij A.G., Rjabchenko S.V. *To a question on classification of structures of management by difficult organizational-technical system* 74

Rostov N.V. *Multiobjective optimization of digital modal controllers based on direct and indirect sounding* 77

Salangin A.A. *Formalization of problems of system designing* 84

Computers and the software

Popov S.G. *Method of construction of optimal repository of relational schemas databases* 91

Anikin I.V., Potapov A.S. *Software-based complex for information security risk assessment based on frame-production knowledge representation* 98

Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

Belov V.V., Boldyrev U.I., Romanov S.V., Shanina A.S. *Experience of application of mathematical simulation for the soil bases of buildings and constructions* 103

Belov V.V., Boldyrev U.I., Klimshin D.V., Romanov S.V. *Modern technologies of mathematical simulation at calculations of wind influence on unique buildings and constructions* 109

Myznikova B.I., Vasilyeva T.P. *Urban development modelling: deterministic approach* 115

Getman A.N., Kudryavtsev O.E. *The estimation for the financial risk of obtaining customs payments below the plan level* 122

Khanova A.A., Bondareva I.O. *Scenario approach to the analysis of quality of logistic service of the enterprise with use of imitating model* 130

Altynbaev R.B., Khibatullin S.G. *Accuracy increase of calculations the time of performance of aerial work on distribution of substances and biological objects* 135

Katasev A.S., Gazimova D.R. *The knowledge representation model in partner expert systems* 139

Zinovyev I.P., Anikin I.V. *Logical inference model based on fuzzy linear regression* 145

Makarov D.A. *Development and application of algorithms of tracking moving object in video observation systems* 151

Malichina G.F., So I.A. *Creating new color perceptual models of human visual system and their collation* 156

Belov V.V., Boldyrev U.I., Klimshin D.V., Shanina A.S. *Modern technologies of mathematical simulation of wide-span metal constructions* 160

Strelets K.I. *Computational solution of the differential equations turbulent diffusion in centrifugal gas flow* 166

Kubaev V.A. *Approximate embedding trees in application to search mathematical expression* 171

Shevtsov U.D. *To the question of modelling of elements of systems of greasing engines des as linear electric chains* 179

Devices, information-measuring systems

Kuznecov D.A. *Automation of forecasting of development, the analysis and estimation of dynamic models of systems* 183

Shalaevsky O.N., Malykhina G.F. *Ontological model for security of information-measuring technologies based on the common criteria* 186

Electronics, technologies of producing the materials of electronic technics

Zhuravlyova L.M. *Izotoptronics as a new direction of nanotechnologies for creation electronic and optoelectronics devices* 193

Information and telecommunication technologies in formation

Strelkova E.V. *Identification of authors and personal data in electronic library systems* 199

Tazetdinov A.D. *About results of application of mathematical model of process of mastering of knowledge in natural language training system* 207

Kudakov A.V. *Automated system of knowledge control* 214

Gerasimova I.B. *Cognitive models of communication processes between of two persons* 221

Scientific seminar SPbSPU 229

About the authors 231

Abstracts 235

УДК 004.942

Д.С. Благов, С.В. Волвенко

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В МЕТЕОРНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В метеорной системе связи используется прерывистый канал передачи с рядом случайных параметров, таких, как время и место появление метеора, численность отражений от метеорных следов, длительность существования и электронная плотность метеорного следа [1–3]. Несмотря на прерывистость и относительно небольшую среднюю пропускную способность (до нескольких десятков, сотен бит/с), метеорная связь имеет целый ряд преимуществ. К ним относятся организация передачи и приема данных в УКВ диапазоне на больших расстояниях (до 2000 км) при использовании радиопередающих устройств, имеющих малые мощности излучения и простые антенны, одновременное обслуживание большого числа корреспондентов на одной рабочей частоте, трудности перехвата и постановки помехи средствами электронного противодействия и др.

Важное достоинство метеорных систем связи – относительно малые энергетические затраты в канале, обусловленные малым уровнем шумов (в основном космического происхождения) и малым поглощением в ионосфере. Это преимущество позволяет делать аппаратуру связи сравнительно малогабаритной и неэнергоемкой. Устойчивость к естественным и искусственным возмущениям в атмосфере Земли позволяет работать в северных широтах, для которых наиболее характерны различные аномалии ионосферы, парализующие средства более длинноволновых диапазонов. Данное свойство представляет особый интерес в чрезвычайных и критических ситуациях, когда метеорные средства могут оказаться единственными, способными в короткий срок восстановить связь [2].

Относительно небольшая скорость передачи информации связана с тем, что канал передачи метеорной системы связи является прерывистым, с большим интервалом следования метеорных «вспышек», с помощью которых организуется передача данных.

Цель статьи – исследование возможности повышения скорости передачи информации в метеорных системах связи путем применения сигналов переменной длительности [4] при гарантированной помехоустойчивости приема сообщений.

Соотношение скорости передачи информации для постоянной и переменной длительности сигналов

Рассмотрим прежде всего метеорный канал связи, имеющий метеорные следы с пониженной электронной плотностью (значения плотности лежат в диапазоне 10^8–10^{14} электронов на метр) [1].

В общем случае для принимаемой мощности сигнала P и спектральной плотности мощности канального шума $N_0/2$, скорость передачи информации определяется выражением [4]:

$$R = \frac{P}{N_0 (E_b / N_0)_{\text{пор}}}, \qquad (1)$$

где $(E_b/N_0)_{\text{пор}}$ – минимальное (пороговое) отношение сигнал/шум на входе приемного устройства, обеспечивающее заданную вероятность ошибки на бит; E_b – энергия сигнала, соответствующего одному биту передаваемого сообщения.

Отношение $(E_b/N_0)_{\text{пор}}$ является фиксированным для данного алгоритма приема сигналов и, соответственно, в этом случае при приеме сигналов, отраженных от метеорного следа и имеющих экспоненциальный закон изменения мощности на длительности пакета, скорость передачи информации также будет являться функцией времени.

Действительно, учитывая, что зависимость мощности принимаемого сигнала от времени для случая следа с пониженной концентрацией электронов имеет вид [2]

$$P(t) = P(0)\exp\left(\frac{-t}{\tau}\right),$$

получим

$$R(t) = \frac{P(0)\exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)}{N_0(E_b / N_0)_{\text{пор}}}, \qquad (2)$$

где $P(0)$ – мощность принимаемого сигнала в момент появления метеорного следа; τ – постоянная времени затухания следа.

Постоянная длительность сигналов в пакете сообщения. Пусть t_f – длительность пакета сообщений, которые нужно передать за время одного метеорного следа. При постоянной длительности сигналов t_s число бит, которые могут быть переданы, определяется выражением:

$$N_B = R(t_f)t_f = \frac{P(0)\exp\left(\frac{-t_f}{\tau}\right)}{N_0(E_b / N_0)_{\text{пор}}}t_f. \qquad (3)$$

Таким образом, при постоянной длительности сигнала, скорость передачи информации определяется значением в момент времени окончания пакета сообщения и отношением .

Определим оптимальное по критерию максимума скорости передаваемой информации значение $(t_f)_{\text{opt}}$ и максимальное число бит передаваемого сообщения при оптимальном значении $(t_f)_{\text{opt}}$.

Максимальное число сигналов, которые могут быть приняты в одном пакете сообщений, может быть найдено дифференцированием (3) по t_f:

$$\frac{dN(t_f)}{dt_f} = \frac{P(0)}{N_0(E_b / N_0)_{\text{пор}}} \times \left[\exp\left(\frac{-2t_f}{\tau}\right) - \frac{2t_f}{\tau}\cdot\exp\left(\frac{-2t_f}{\tau}\right)\right] = 0. \qquad (4)$$

Тогда максимальная скорость передаваемой информации будет равна:

$$R_{opt} = \frac{P(0)}{N_0(E_b / N_0)_{\text{пор}}e}. \qquad (5)$$

Переменная длительность сигналов в пакете сообщения. Использование переменной скорости передачи данных предполагает изменение длительности символов в пакете. Критерий выбора длительности символа – постоянство энергии сигнала или постоянство отношения энергии сигнала к спектральной плотности средней мощности шума на длительности одного пакета сообщения. При этом длительность каждого последующего символа будет больше длительности предыдущего. Очевидно, что в этом случае в зависимости от длительности пакета будет передаваться различное число символов.

Определим число бит, которое может быть принято на длительности одного пакета сообщений. Из (2) следует, что скорость передачи информации экспоненциально уменьшается со временем. В течение некоторого малого интервала времени dt скорость будет постоянной. Число сигналов, принятых за время dt, будет равно:

$$dN = R(t)dt.$$

Полное число бит определяется выражением:

$$N_{MAX} = \int_0^\infty dN_B = \frac{P(0)}{N_0\left(E_b / N_0\right)_{\text{пор}}}\int_0^\infty \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)dt. \qquad (6)$$

Следовательно:

$$N_{MAX} = \frac{\tau P(0)}{N_0(E_b / N_0)_{\text{пор}}}. \qquad (7)$$

Сравнивая (7) и (5), получим выигрыш в скорости передачи информации при использовании переменной длительности сигналов:

$$I = \frac{\frac{\tau P(0)}{N_0(E_b / N_0)_{\text{пор}}}}{\frac{\tau P_R(0)}{N_0(E_b / N_0)_{\text{пор}}e}} = e = 2{,}72. \qquad (8)$$

Для метеорной системы связи, использующей метеорные следы с пониженной концентрацией электронов, можно показать, что скорость передачи информации будет больше в два раза при использовании переменной длительности сигналов, чем для случая использования сигналов постоянной длительности.

Вероятностные характеристики приема сообщений

Вероятность ошибочного приема бита сообщения. При приеме сигналов, отраженных от метеорных следов, отношение сигнал/шум на входе приемника изменяется на длительности пакета. В этих условиях вероятность ошибки на бит p_{bk} будет зависеть от отношения сигнал/шум h_k каждого k-го ($k = 1, 2, \ldots, N$) сигнала в пакете сообщения и будет максимальной для последних битов пакета. Для случая когерентного алгоритма приема противоположных двоичных фазоманипулированных сигналов вероятность ошибки на бит

$$p_{bk} = \frac{1}{2} erfc(h_k), \quad (9)$$

для некогерентного приема ортогональных в усиленном смысле сигналов:

$$p_{bk} = \frac{1}{2} e^{-0.5h^2_k}, \quad (10)$$

где $erfc(x)$ – табулированная функция ошибок.

Вероятность ошибочного приема пакета сообщения. Вероятность ошибочного приема пакета сообщения, состоящего из I бит, может быть выражена через вероятность ошибки на бит следующим образом:

$$p_e = 1 - \prod_{k=1}^{I} (1 - p_{bk}). \quad (11)$$

Под вероятностью доставки заданного сообщения на определенном промежутке времени будет пониматься вероятность события, что данное сообщение было хотя бы раз принято без ошибок на этом промежутке времени.

Средняя вероятность ошибки на бит. Суть методики вычисления средней вероятности ошибки на бит заключается в следующем. Пусть на некотором интервале анализа T_a имеется L метеорных следов и задано пороговое значение отношения сигнал/шум $h^2_{\text{пор}} = (E_b/N_0)_{\text{пор}}$ – на входе приемного устройства, при котором канал еще существует. Если отношение сигнал/шум на входе приемного устройства опускается ниже порогового, то считается, что канал пропадает и передача прекращается. При этом предполагается наличие обратного канала передачи, по которому на пункт отправки пакета сообщений будет поступать информация об уровне сигнала в точке приема.

На длительности одного пакета, отраженного от i-го метеорного следа, передается $N(i)$ сигналов и вероятность ошибочного приема каждого из них равна .

Средняя вероятность ошибочного приема сигналов в пакете, отраженных от i-го метеорного следа, очевидно, будет равна:

$$p_b^i = \frac{1}{N(i)} \sum_{k=1}^{N(i)} p_{bk}^i .$$

Положим, что интервал анализа достаточно большой, и во время существования канала связи имеются пакеты различной длительности, число которых равно L. Тогда можно вычислить средние вероятности ошибочного приема сигналов, отраженных от всех L метеорных следов, имеющихся на интервале анализа T_a. Средняя вероятность ошибки для метеорного канала связи равна:

$$p_{\text{ср}} = \frac{p_b^1 + p_b^2 + \ldots + p_b^L}{L}.$$

Вероятность доставки заданного объема информации. Под вероятностью доставки будем понимать вероятность того, что на интервале наблюдения заданный пакет сообщений был хотя бы один раз принят без ошибок.

Будем считать, что сообщение, состоящее из I бит, передается в одном пакете. При вычислении вероятности доставки будем считать, что используются только те метеорные следы, которые обеспечивают передачу одного пакета сигналов. Таким образом, если на интервале анализа появляется N метеорных следов, обеспечивающих передачу информации, то происходит N повторений пакетов сигналов.

В случае использования постоянной длительности сигналов отношение сигнал/шум будет меняться как от следа к следу (электронная плотность в момент появления следа является случайной величиной), так и на протяжении следа (благодаря рассеянию электронного облака). Таким образом, для постоянной скорости передачи первые сигналы в пакете сообщения менее подвержены ошибкам, чем последующие, т. к. отношение сигнал/шум на входе приемника с увеличением времени существования пакета уменьшается.

В случае использования переменной длительности сигналов отношение сигнал/шум будет сохраняться постоянным за счет увеличения в пакете длительности последующих сигналов по сравнению с предыдущими. Вероятность ошибки на бит для всех символов пакета будет одинакова.

Частота появления метеорного следа – случайная величина, которая описывается распределением Пуассона. Закон распределения n следов за время t будет иметь следующий вид [1]:

$$P(n,t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} \exp(-\lambda t),$$

где λ – средняя частота (интенсивность) появления метеорных следов.

Выразим вероятность доставки P_I заданного объема информации I за время T_a через вероятность $P(I/n)$ доставки сообщения за n метеорных следов, каждый из которых обеспечивают передачу одного пакета сигналов, и вероятность появления n метеорных следов за время T_a $P(n, T_a)$:

$$P_I = \sum_{n=1}^{\infty} P(I/n)P(n, T_a). \qquad (12)$$

Тогда получим:

$$P_I = \sum_{n=1}^{\infty} P(I/n)P(n, T_a) =$$
$$= \sum_{n=1}^{\infty} (1 - p_e^n) \frac{(T_a\lambda)^n}{n!} \exp(-T_a\lambda),$$

где p_e^n – вероятность ошибочного приема n-го пакета сообщений.

Результаты моделирования

Для оценки различных характеристик метеорной системы связи используется имитационная модель системы, написанная на языке C++ в среде Visual Studio 2008. Входные параметры модели:

максимальное и минимальное значения отношения сигнал/шум на входе приемного устройства в момент появления метеорного следа, интенсивность появления метеорных следов;

пороговое значение отношения сигнал/шум, которое используется при вычислении средней вероятности ошибки в зависимости от интенсивности появления следов;

вещательный или двухточечный протокол работы системы;

постоянная или переменная длительность сигналов;

количество реализаций шума;

длительность интервала анализа.

На рис. 1 приведены формы огибающей $A(t)$ непрерывного колебания на частоте 60–100 МГц на входе приемного устройства (аддитивный канальный шум отсутствует). Интервал анализа составляет 50 с, интенсивность появления метеорных следов 0,5 следа/с, постоянная времени затухания следа 0,1 с.

Рассмотрим зависимость скорости передачи информации от интенсивности появления метеорных следов для различных значений порогового отношения сигнал/шум (рис. 2). Считается заданным пороговое значение отношения сигнал/шум $h^2_{\text{пор}}$, а, следовательно, средняя вероятность ошибки на бит. Рассматривается идеализированный случай, когда передача и прием символов происходят на всем интервале существования канала. При имитационном моделировании интервал анализа составлял 5000 с, скорость передачи символов 1 Кбит/с, постоянная времени затухания следа 0,1 с. В качестве сигналов использовались сигналы с двоичной фазовой манипуляцией и оптимальный алгоритм когерентного приема.

Из данной зависимости видно, что чем больше интенсивность появления метеорных следов, тем больше скорость передачи информации при заданной средней вероятности ошибки, определяемой соответствующим значением $h^2_{\text{пор}}$.

На рис. 3 приведена зависимость объема переданной информации от интенсивности появления

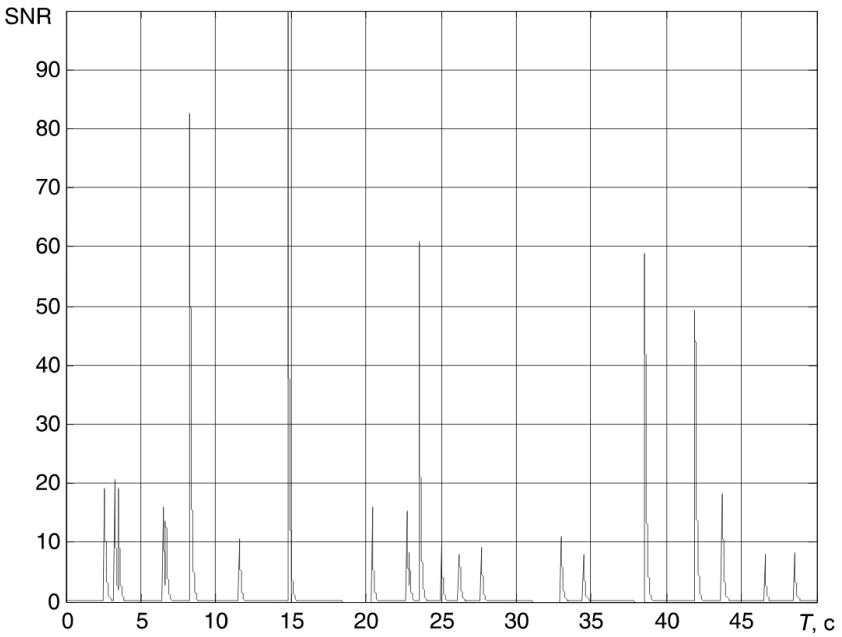


Рис. 1. Вид огибающей непрерывного колебания на входе приемного устройства в метеорной системе связи

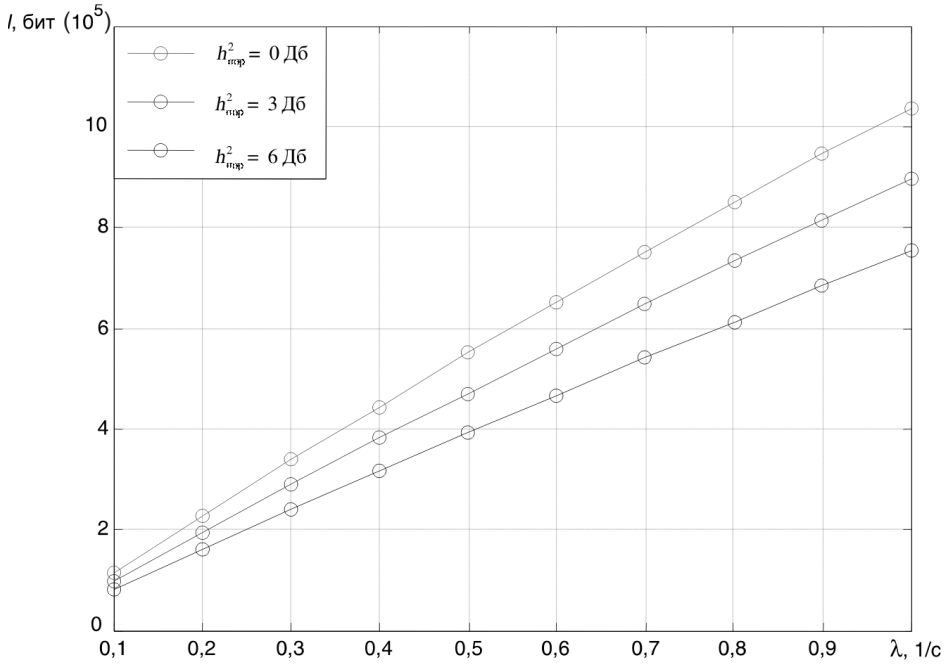


Рис. 2. Зависимость объемов передаваемой информации от интенсивности появления метеорных следов для различных пороговых значений сигнал/шум

метеорных следов при фиксированной средней вероятности ошибки на бит для случая использования постоянной и переменной скоростей передачи символов. При имитационном моделировании интервал анализа составлял 500 с, скорость передачи символов 1 Кбит/с, постоянная времени затухания следа 0,1 с.

Значения средней вероятности ошибочного приема сигналов в передаваемом потоке сообщений одинаковые и равные $p_b = 10^{-3}$ для постоянной и переменной скорости передачи (см. рис. 3). Из сравнения этих зависимостей видно, что, например, для интенсивности появления метеорных следов $\lambda = 0{,}5$ 1/с при переменной длительности

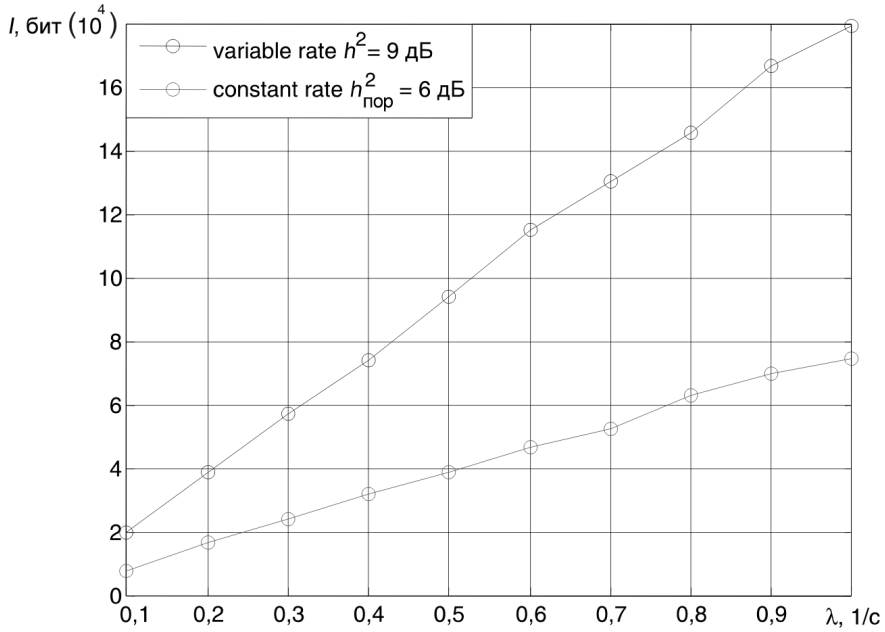


Рис. 3. Зависимость объема переданной информации от интенсивности для случаев использования постоянной и переменной скоростей передачи

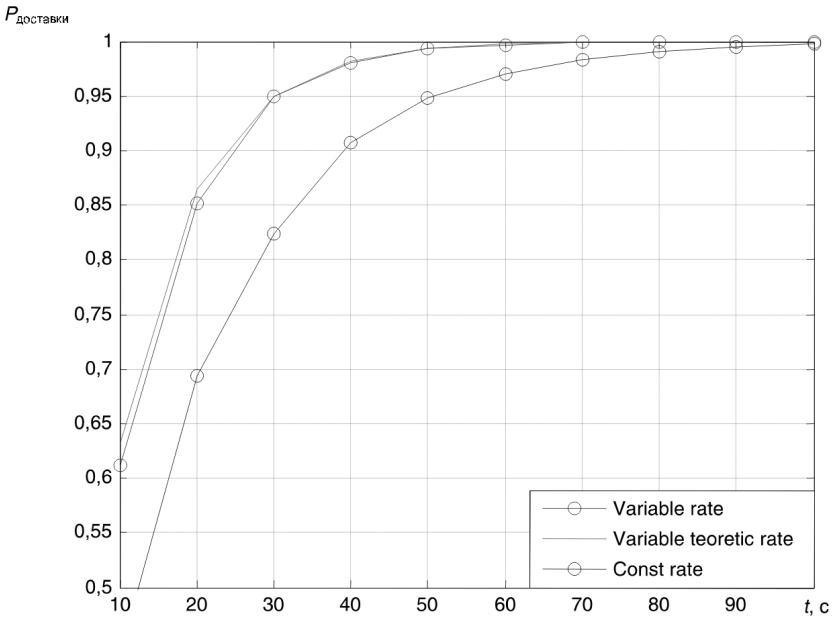


Рис. 4. Зависимость вероятности доставки заданного объема информации от времени для постоянной и переменной скоростей передачи данных, полученная в результате расчета и в результате моделирования

сигналов скорость передачи информации увеличивается более чем в два раза по сравнению с классическим случаем использования сигналов постоянной длительности.

Зависимости вероятности доставки P_1 заданного объема информации от времени приведены на рис. 4. Протокол передачи пакетов сообщений предполагает использование на интервале наблюдения L метеорных следов, пригодных для L повторений пакетов сообщений. Размер пакета сообщения составлял 190 бит, интенсивность появления следов 0,1/с, скорость передачи символов 1 Кбит/с, постоянная времени затухания метеорного следа 0,1 с. При приеме использовался алгоритм оптимальной когерентной обработки двоичных фазоманипулированных сигналов.

Из рис. 4 видно, что при использовании пакета длиной 190 бит имеет место значительный выигрыш по времени доставки при использовании сигналов переменной длительности при фиксированной вероятности доставки сообщения.

В результате проведенных теоретических расчетов и имитационного моделирования получены следующие результаты.

Объем информации, который может быть передан за одну вспышку при заданном пороговом отношении сигнал/шум, может быть повышен в 2,7 раза для следов с пониженной концентрацией электронов при использовании переменной скорости передачи данных по сравнению с постоянной скоростью.

Показано, что имеет место выигрыш по времени доставки при фиксированной вероятности доставки для случая использования переменной длительности сигналов по сравнению с постоянной.

В результате имитационного моделирования получены зависимости объема передаваемой информации от интенсивности появления метеорных следов для постоянной и переменной длительностей сигналов.

При использовании сигналов переменной длительности можно получить значительный выигрыш по объему передаваемой информации по сравнению со случаем использования классических сигналов при фиксированной средней вероятности ошибки на бит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волвенко, С.В.** Имитационная модель метеорной радиотехнической системы передачи сообщений [Текст]/С.В. **Волвенко, С.Б. Макаров//Проблемы информационной безопасности.**–2007.–№ 1. С. 73–85.

2. **Abel, M.W.** Meteor burst communication: bits burst performance bounce [Текст]/M.W. **Abel//IEEE Trans-**

actions on communication.–1986.–Vol. com–34. № 9. P. 927–936.

3. **Шомников, М.А.** Оценка эффективности функционирования метеорной радиолинии [Текст]/ М.А. Шомников, М.Ю. Литовкин//Радиотехника.–1994.–№ 8. С. 45–53.

4. **Davidovici, S.** Performance of meteor-burst communication system using packet messages with variable data rates [Текст]/S. Davidovici, E. Kanterakis//IEEE Transactions on communication.–1989.–Vol. 37. № 1. P. 6–17.

УДК 351.759.6

В.Г. Прокошев, М.М. Рожков, П.Ю. Шамин

ПРОБЛЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ С ОДНИМ ЭТАЛОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЕМ

В последние годы происходит всё более широкое внедрение технологий биометрической идентификации людей. Рост интереса к этим технологиям объясняется, с одной стороны, возрастающей потребностью в таких технологиях, в основном, связанной с необходимостью парирования террористических и криминальных угроз, а с другой стороны, – расширяющимися возможностями в этой сфере. Повышение эффективности технологий биометрической идентификации обеспечивается ростом производительности вычислительной техники, что делает возможным быстрый поиск в больших базах данных биометрических признаков и позволяет в реальном времени реализовывать всё более сложные и эффективные алгоритмы и наборы биометрических признаков.

Несмотря на то, что методы идентификации, основанные на определении отпечатков пальцев или сканировании радужной оболочки, возможно, более точны, распознавание лиц всегда было в центре внимания ученых в силу своей «неагрессивности» по отношению к пользователям.

Обзор проблемы SSPP

Степень точности существующих методов автоматического распознавания лиц зависит от количества фотографий-ракурсов распознаваемых людей, используемых для тренировки системы – так называемых *тренировочных* или *эталонных изображений* (sample). Чем меньше тренировочных (эталонных) изображений для каждого человека использует система, тем ниже ее точность.

Ситуация, когда система использует только одно эталонное изображение, приводит к значительному снижению точности распознавания. Данная проблема в научном сообществе называется *проблемой одного эталонного изображения*. В англоязычных источниках эта проблема фигурирует под аббревиатурами SSPP («Single Sample per Person») [5] или OSS («One Sample Size») [6]. Среди задач автоматического распознавания лиц проблема SSPP занимает особое место.

В связи с важным практическим значением проблемы SSPP, в этом направлении в настоящее время ведутся многочисленные исследования. Эффективность решения задачи SSPP алгоритмами, рассчитанными на обучение с использованием многих ракурсов, представлена в табл. 1. Алгоритмы тестировались на разных базах изображений (AR и FERET) с различным количеством персон в базах. Для распознавания использовались фотографии персон, которые заведомо есть в базе. Корректность распознавания показывает насколько хорошо алгоритм находит в базе изображений лиц фотографию того же человека.

Как видим из таблицы, корректность работы алгоритмов для решения проблемы SSPP невысока. Поэтому ведутся исследования, направленные на повышение корректности распознавания. Основное направление исследований в рамках проблемы SSPP заключается в следующем.

Информация, отсутствие которой обусловлено наличием в базе только одного ракурса, восполняется различными, иногда искусственными, методами. После чего применяются хорошо зарекомендовавшие себя стандартные статистиче-

Таблица 1

Сравнение некоторых алгоритмов [4]

Алгоритм	База изображений	Кол-во персон	Корректность распознавания, %
Метод вероятностного подпространства	AR	100	82,3
Двумерный метод главных компонент	AR	100	74,8
Дискриминантный метод главных компонент	FERET	256	72,0
Компонентный линейный дискриминантный анализ	FERET	70	78,6

ские методы. Остановимся подробнее на схемах подобного типа.

В [7] предлагается модифицировать метод линейного дискриминанта Фишера. Этот метод неприменим в чистом виде для решения проблемы SSPP, т. к. ему требуется более одного обучающего изображения для каждого человека. Авторы предлагают создать некоторый обобщенный тренировочный набор, состоящий из нескольких изображений для каждого человека, и обучить на нем модель. А затем, используя прогнозирование, применить результаты обучения для распознавания людей из базы уже с единственным изображением для одного человека.

В работе [6] предлагается использовать механизмы регрессии (т. е. вероятностные механизмы) в стандартных алгоритмах распознавания: в методе главных компонент и методе наименьших частных квадратов.

В [8] предлагается восстанавливать дополнительные ракурсы для лица, представленного одной тренировочной фотографией. А затем использовать имеющиеся алгоритмы для распознавания.

В данной статье мы рассмотрим варианты распознавания, не использующие синтез дополнительной информации, во многом основанный на эвристических принципах. Предлагается модель распознавания, которая в максимальной степени использует только имеющуюся информацию. Мы будем применять нахождение ближайшего эталона, используя различные техники (методики). Подбор и компоновка взаимодействующих (конкурирующих) методик и составляет предмет нашего исследования.

Модель распознавания

В дальнейшем используются следующие понятия: *ракурс* – это фотография лица некоторого человека; *класс* – набор ракурсов одного и того же человека. Рассматривается проблема распознавания в постановке SSPP в следующем конкретном формате. База содержит набор классов, каждый из которых представлен одним ракурсом (эталоном). Тестовое множество устроено точно так же, как и база. То есть содержит тот же самый набор классов, представленных одним тестовым ракурсом; тесовые ракурсы, естественно, не тождественны соответствующим эталонам.

Каждый тестовый ракурс проходит два испытания: во-первых, эталонный ракурс, представляющий его класс в базе, в ней содержится; во-вторых, соответствующий эталон из базы изымается.

Ошибка первого рода (False Reject Rate) возникает, когда эталон для тестового ракурса присутствует в базе, но система считает, что его нет в базе. Ошибка второго рода (False Accept Rate) возникает при ложном срабатывании системы на тестовый ракурс, для которого нет эталона.

Предлагается трехуровневая структура системы распознавания – методика, блок, система.

Методика. Алгоритм, который присваивает ракурсам некоторые веса w_i, назовем *методикой*. Другими словами, методика – это отображение $met_t : E \rightarrow \{1 = w_1, w_2, ..., w_K, w_{K+1} = 0\}$, где E – множество эталонных ракурсов; следует обратить внимание, что методика «параметризуется» тестовым ракурсом. Предположим, что веса удовлетворяют следующим условиям $1 = w_1 > w_2 > ... > w_K > w_{K+1} = 0$. Для каждого i вес w_i присваивается ровно $s_i > 0$ элементам из множества эталонов; остальным присваивается вес $w_{K+1} = 0$. Следует отметить, что смысл этого отображения (алгоритма) состоит в последовательном присвоении весов эталонам, начиная со старшего веса. То есть существует некоторое правило, по которому выбирается каждый следующий эталон. Веса

присваиваются до тех пор, пока не исчерпаются $s = s_1 + s_2 + ... + s_K$ эталонов. После чего оставшимся эталонам присваивается нулевой вес; описанная процедура может работать и на любом подмножестве множества эталонов.

Критерий принятия решения таков. Пусть $w_{кр}$ – некоторое критическое значение (в дальнейшем всегда $0 < w_{кр} \le 1$), $e_m \in E$ – некоторый ракурс. Если множество $L(t) = \{e_m : met_t(e_m) \ge w_{кр}\}$ не пусто, то принимается решение – «t принадлежит базе», в противном случае считается, что ракурс не содержит в базе соответствующего ему эталона.

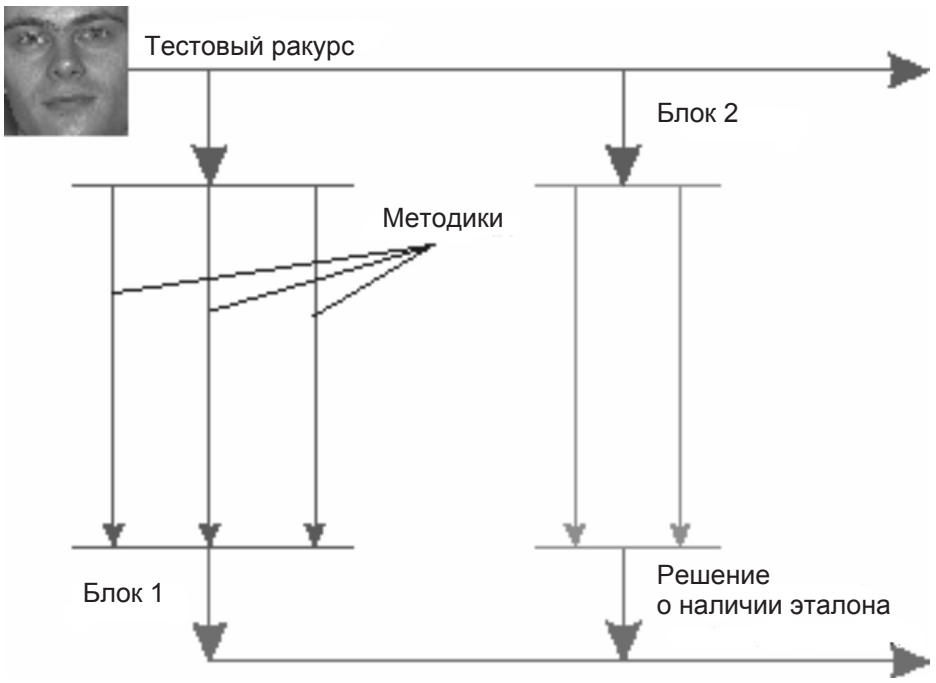
Блок. Пусть заданы, например, две методики $met_{t,1}$, $met_{t,2}$. Тогда $met_t = \alpha_1 met_{t,1} + \alpha_2 met_{t,2}$ называется *блоком*; весовые коэффициенты α_1, α_2 неотрицательны и $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. В итоге блок формирует свой список по тому же принципу, что и отдельная методика, т. е. предлагает те эталоны, суммарный вес которых не меньше некоторого критического уровня. Естественно, что блок может содержать произвольное число методик.

Система распознавания. Несколько блоков образуют систему. Пусть для некоторого тестового ракурса i-й блок формирует свой список $L_i(t)$. Система будет считать, что тестовый ракурс t имеет соответствующий ему класс в базе, если $L^{системы}(t) = \bigcup_i L_i(t) \ne \emptyset$.

Множество $L^{системы}(t)$ является списком эталонов, которые система считает соответствующими тестовому ракурсу t. Другими словами, «список подозреваемых» в похожести на тестовый ракурс. На рисунке приведена графическая схема системы распознавания.

Замечания. 1. В чистом виде методика обязательно присваивает некоторому эталону вес. Следовательно, список, который предъявит методика, всегда будет не пуст, т. е. утверждается – эталон в базе есть, независимо от того, присутствует в базе эталон для тестового ракурса на самом деле или нет. Такой ответ может быть удовлетворительным, если заведомо известно, что для тестового ракурса в базе имеется эталон, требуется лишь определить конкретный класс этого ракурса. В противном случае, когда для тестового ракурса нет эталона в базе, такой ответ будет заведомо ошибочным (т. е. ошибка второго рода будет равна 100 %). Тем не менее, отдельная методика также подвергается исследованиям на «надежность». Выясняется процент попадания эталона, соответствующего тестовому ракурсу, в главную часть списка (т. е. в множество тех эталонов, которым присваивается вес 1).

2. Итак, чтобы иметь возможность оценивать ошибки первого и второго рода, отдельные методики следует формировать в блоки. При этом бу-



Графическая схема системы распознавания

дем руководствоваться следующими принципами. Методики в блоке должны формироваться так, чтобы при определении весов эталонов использовались разные свойства ракурсов; одна методика опирается на один набор свойств ракурсов, другая – на другой. Как это обеспечить практически – заранее не ясно. Это можно определить, лишь опираясь на интуицию и экспериментально.

3. Блок может давать правильный ответ – «соответствующий тестовому ракурсу класс принадлежит базе». Однако возможны следующие нежелательные варианты такого ответа: во-первых, нужного эталона может не оказаться в предлагаемом списке; во-вторых, этот список может быть чрезмерно велик. Из этого следует еще один принцип: при создании блоков следует комбинировать, по возможности, большее количество чистых методик.

4. Объединенные в систему блоки между собой не конкурируют, а сотрудничают. Это обстоятельство улучшает процент распознавания системы в целом (уменьшается ошибка первого рода), однако вполне может повысить вероятность ложного срабатывания системы (ошибка второго рода). Исходя из этого, определим следующие требования к блокам: для уменьшения ошибки первого рода желательно, чтобы блоки дополняли друг друга; если какой-либо ракурс не распознается одним блоком, то желательно, чтобы он распознавался другим. Если количество ложных срабатываний блоков не удается уменьшить, то желательно, чтобы ложное срабатывание блоки давали на одних и тех же ракурсах (чтобы не росла ошибка второго рода).

Отобранные методики и результаты работы модели

Понятие методики, сформулированное выше, носит слишком общий характер. Для конкретных экспериментов, результаты которых приводятся в статье, будем использовать методики, основанные на «принципе ближайшего элемента». Весам, которые присваиваются эталонам, также придадим вполне конкретный характер. Пусть эталоны расположены в порядке увеличения расстояния от тестового ракурса; этому расположению соответствует нумерация $n = 0, 1, ..., N$. Присвоим эталону, имеющему номер n вес $w = a^{-n}$; в качестве основания экспоненты предлагается выбирать число, близкое к двум.

Испытания проводились на изображениях, полученных из набора fafb базы изображений лиц Color FERET. Тестовые и эталонные изображения были получены из оригинальных изображений базы Color FERET путем вырезания области, ограниченной прямоугольником: от 50 пикселов левее левого глаза до 50 пикселов правее правого глаза; от 50 пикселов выше «верхнего» глаза до 50 пикселов ниже рта. Координаты глаз и рта были взяты из xml-файлов описания, находящихся в подкаталогах каталога colorferet\data\ground_truths\xml базы изображений лиц Color FERET. При обрезке изображений лиц типа fa и изображений лиц типа fb использовались координаты для изображений типа лиц fa. Поскольку не для всех изображений в файлах описаний данные координаты имеются, то в испытаниях использовались изображения 847 людей (всего $2 \times 847 = 1694$ изображения) из 993 людей, чьи изображения типа fa и fb имеются в базе Color FERET.

По результатам экспериментов были отобраны следующие методики.

1. Текстурные гистограммы с сегментацией по прямоугольным блокам.

Методика производит разложение изображения по базису Фрея–Чена [1] с последующим подсчетом пикселов, в окрестности которых наблюдается преобладание одного из типов текстуры: градиента (A), пульсации (B), линии (C) и лапласиана (D). Затем строится порядковая гистограмма, имеющая 24 колонки по количеству возможных перестановок данных четырех типов текстуры в порядке преобладания (от A > B > C > D до > B >A).

Метрика определяется следующим образом:

$$R(\bar{x}, \bar{y}) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\left|\frac{x_{i,j} - y_{i,j}}{M}\right|^{0,45},$$

где N – число гистограмм в наборе, M – число значений в гистограмме.

2. Атрибуты на базе инвариантов Цернике.

Методика строит для ракурса размерами $M \times N$ его Фурье-образ:

$$F(u,v) = \frac{1}{M \cdot N}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1} I[x,y] \times$$

$$\times \exp(-i2\pi(\frac{x \cdot u}{M} + \frac{y \cdot v}{N})).$$

Величины $F(u, v) = a + ib$ – комплексные. Далее строим для образа спектр мощности $\sqrt{F(u,v)} = \sqrt{a^2 + b^2}$; он инвариантен по отношению

к небольшим перемещениям объектов на исходном изображении [1]. Затем производится разложение полученного спектра мощности по ортогональному базису Цернике. Коэффициенты $c_{m,n}$ такого разложения называются *коэффициентами Цернике*. По этим коэффициентам строятся инварианты следующего вида: $c^2_{m,n} + c^2_{-m,n}$. Полученные инварианты устойчивы также и к повороту исходного изображения. Метрика сравнивает инварианты для двух изображений. Экспериментально выбрана метрика, дающая лучшие результаты:

$$R(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left| \frac{x_i - y_i}{x_i + y_i} \right|}{N},$$

где N – число инвариантов Цернике.

3. Частотная гистограмма с сегментацией по прямоугольным блокам.

Для ракурса строится его Фурье-образ. Затем осуществляется подсчет суммы интенсивностей, попадающих в различные интервалы частот, деленной на суммарную интенсивность Фурье-образа. Границы диапазонов частот выбраны экспериментально и составляют: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 80, 90, 100, 110, 120. Используется следующая метрика для гистограмм:

$$R(\bar{x}, \bar{y}) = \sum_{i=1}^{N} \left| \log_{10}(x_i) - \log_{10}(y_i) \right|.$$

Изображения предварительно подвергаются прямоугольно-блочной сегментации.

4. Частотная гистограмма с сегментацией по яркости.

Рассчитывается так же, как и методика № 3. Однако производится предварительная яркостная сегментация изображений.

5. Полиномы Лежандра

Для изображения *MxN* моменты Лежандра вычисляются следующим образом [2]:

$$L(k,l) = \frac{(2k+1)(2l+1)}{4} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} P_k(x) P_{l(y)} \cdot I(x,y).$$

Для полиномов Лежандра используется метрика L_2. Количество коэффициентов Лежандра определяется экспериментально для улучшения результатов распознавания.

6. Текстурные энергетические карты Лавса.

Механизм построения энергетических карт Лавса подробно описан в [1]. Энергетические карты являются текстурными характеристиками изображений. С их помощью можно анализировать наличие различных текстурных примитивов на изображении (края, пятна, рябь). Всего энергетических карт девять. В качестве метрики между картами используется L_2. Эксперименты показали, что лучшие результаты распознавания дает карта E5E5.

Оптимизированные параметры и результаты отобранных методик показаны в табл. 2.

Результаты эксперимента

Точность распознавания. Эксперимент проводился в условиях наличия в базе эталона для тестовых ракурсов. Система выделяла эталон с консолидированным наибольшим весом. В 90 % случаев система поставила на первое место правильный эталон.

Для оценки работы системы в целом использовался показатель «процент корректного распознавания», который определялся следующим образом. За счет подбора уровня критического

Таблица 2

Перечень методик и параметры их комбинирования

Методика	Надежность, %	Вес α_i	Основание экспоненты α_i
Текстурные гистограммы с использованием базиса Фрея–Чена и сегментацией по прямоугольным блокам	75,56	0,229	1,8
Атрибуты на базе инвариантов Цернике	58,09	0,103	2
Частотная гистограмма с сегментацией по прямоугольным блокам	65,53	0,103	1,5
Частотная гистограмма с сегментацией по яркости	58,80	0,166	1,4
Полиномы Лежандра	74,50	0,166	1,3
Текстурные энергетические карты Лавса	87,13	0,233	1,8

значения достигалось выравнивание ошибок первого и второго рода, т. е. находилась ошибка EER (equal error rate); вычитанием ее из значения 100 % находился процент корректного распознавания. В поставленном эксперименте процент корректного распознавания составил 85,5 %.

Предложена модульная конструкция системы распознавания, основанная на архитектуре, состоящей из «блоков конкурирующих методик».

Система апробирована на базе Color FERET. Полученные результаты, соотнесенные с аналогичными показателями, содержащимися в [4], говорят о достаточно высокой эффективности модели, показанной в эксперименте. Предложенная архитектура позволяет достаточно полно использовать информацию, содержащуюся в двух сравниваемых фотографиях. Блоковый характер дает возможность гармонично объединять методики разных типов: текстурные и использующие другие принципы (свертки, 2-D инварианты).

Представленная модель не противоречит принципу «распознаем как человек» [3]. Следует отметить, что методики, из которых компонуются блоки, универсальны; алгоритмы могут применяться не только для сравнения и идентификации лиц, но и для сравнения и поиска в базе любых образов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стокман, Д.** Компьютерное зрение [Текст]/Д. Стокман, Л Шапиро.–М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.–752 с.

2. **Брилюк, Д.** Распознавание человека по изображению лица и нейросетевые методы [Электронный ресурс]/Д. Брилюк, В. Старовойтов. http://neuroface.narod.ru/files/preprint_neuroface.rar

3. **Пентланд, А.С.** Распознавание лиц для интеллектуальных сред [Электронный ресурс]/А.С. Пентланд, Т. Чаудхари//Открытые Системы.–2000.–№ 03. http://www.osp.ru/os/2000/03/

4. **Tan, X** Face recognition from a single image per person: A survey [Текст]/X. Tan, S. Chen, Z. Zhou [et al.]//Pattern Recognition.–Sept. 2006.–Vol. 39 (9). –P. 1725–1745.

5. **Tan, X** Recognition from a Single Sample per Person with Multiple SOM Fusion [Текст]/X. Tan, J. Liu, S. Chen//Lecture Notes in Computer Science.–2006.–Vol. 3972/2006.–P. 128-133.

6. **Štruc, V.** Using Regression Techniques for Coping with the One-Sample-Size Problem of Face Recognition [Текст]/V. Štruc, R. Gajšek, F. Mihelič, N. Pavešić// Electrotechnical review. 2009.–Vol. 76.–№ 1–2. –P. 7–12.

7. **Su, Y** Adaptive Generic Learning for Face Recognition from a Single Sample per Person [Текст]/Y. Su, S. Shan, X. Chen [et al.]//CVPR 2010: 23rd IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition.–San Francisco, USA. June 13-18, 2010.–P. 2699–2706.

8. **Beymer, D.** Face Recognition From One Example View [Текст]/D. Beymer, T. Poggio//Computer Vision, IEEE International Conf. 23 June 1995.–P. 500–507

УДК 025.4.03

И.С. Блеканов, Д.С. Бондаренко

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПОИСКА ТЕМАТИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ В ВЕБ-ПРОСТРАНСТВЕ

В течение последнего десятилетия наблюдается экспоненциальный рост числа Веб-документов в информационном Веб-пространстве. Только в открытой (индексированной) части Веб на сегодняшний день насчитывается более 20 млрд документов и более 200 млн Веб-сайтов, не говоря уже о скрытой (неиндексированной) части, в которой эти показатели больше в несколько раз [12].

Сложность задачи поиска в Веб-пространстве привела к появлению целого класса подходов к поиску, учитывающих различные особенности Веб-пространства, что расширило спектр возможностей поисковых систем. Большинство таких систем имеют систему Веб-краулеров [4], необходимых для построения индекса существенной части Веб и отслеживающих появление новых и обнов-

ление старых документов в нем. В силу быстрого роста Веб-пространства [7, 12] проблема построения алгоритма, по которому Веб-краулер его обходит как первично, так и с целью обновления индекса, является очень сложной и актуальной.

В данной статье предлагается алгоритм обхода Веб-пространства, цель которого – посещение в первую очередь наиболее полезных документов. Для этого предлагается совместное использование алгоритма HITS [8], который учитывает гиперссылочную структуру документов, и TF-IDF [10] взвешивание, учитывающее информацию о тексте документа. Оценивается также качество поиска данного алгоритма обхода Веб-пространства и сравнивается с существующими алгоритмами [1, 3].

Принципы и алгоритм работы системы. Известно, что естественной моделью представления Веб-пространства является ориентированный *Веб-граф* [5], в котором вершины соответствуют Веб-страницам, а дуги – соединяющим страницы гиперссылкам. Под *обходом Веб-пространства* (исследование Веб-графа) понимают процесс поиска информационных источников и гиперссылок, начиная с некоторого начального подмножества Веб-страниц. За выполнение данной процедуры отвечает *Веб-краулер* (поисковый робот).

Задача поисковых роботов – обход Веб-графа определенным образом с целью сбора информации или понимания структуры и полезности каких-либо Веб-страниц [4]. А также передача собранной информации для анализа другим приложениям поисковых систем. Веб-краулеры упрощают поиск информации в Веб-пространстве, повышая его качество и эффективность.

В настоящей статье рассматривается тематический поисковый робот с разными алгоритмами обхода Веб-пространства:

тематический Веб-краулер на основе TF-IDF взвешивания [3];

на основе алгоритма HITS [1];

на основе совместного использования алгоритмов HITS и TF-IDF.

Одна из главных задач тематического Веб-краулера – поиск и добавление в коллекцию документов, в первую очередь, наиболее значимых информационных источников, что обеспечивает коллекцию высокого качества [4]. Результатами обхода Веб-пространства вышеперечисленными алгоритмами являются тематические сообщества [6] значимых Веб-страниц.

В данном исследовании значимые источники информации в Веб-пространстве определяются анализом гиперссылочной структуры найденных Веб-краулером документов, используя *алгоритм Клеинберга HITS* [8], и текста документа, используя *алгоритм взвешивания TF-IDF* [10] с учетом взаимного положения слов [2]. Наиболее значимыми по HITS Веб-страницами в рамках заданной темы принято считать *авторитетные страницы*, на которые ссылаются другие информационные источники, относящиеся к данной теме. Данное свойство позволяет выявить *индексные страницы* (*hubs*). Другими словами, для каждого источника информации p ставится в соответствие пара неотрицательных весов $(x^{<p>}, y^{<p>})$, где $x^{<p>}$, $y^{<p>}$ – веса для авторитетной и для индексной страниц соответственно. В работе Клеинберга [8] значение весов как авторитетных, так и индексных источников информации, вычисляется с помощью заданных весов $\{x^{<p>}\}$, $\{y^{<p>}\}$ и итеративного применения операций

$$x^{<p>} \leftarrow \sum_{\forall q: q \to p} y^{<q>}, \qquad (1)$$

$$y^{<p>} \leftarrow \sum_{\forall q: p \to q} x^{<q>}. \qquad (2)$$

Таким образом, на хорошую авторитетную страницу ссылается много хороших индексных страниц, а хорошая индексная страница ссылается на хорошие авторитетные страницы. Целью алгоритма HITS является поиск наиболее качественных авторитетных и наиболее качественных индексных информационных источников.

Алгоритм TF-IDF использует информацию о частоте встречаемости слов запроса в тексте Веб-страниц. Как правило, частота определяется отношением числа вхождения слова (термина) t в документ d к общему количеству слов в d. Данная оценка лежит в основе такого популярного метода вычисления оценки меры релевантности как

$$tf - idf_{t,d} = tf_{t,d} \cdot idf_t, \qquad (3)$$

где t – термин документа (слово запроса); d – текущий документ; $tf_{t,d}$ – число вхождения термина t в документ d; $idf_t = \log \frac{N}{df_t}$ (df_t – множество документов, содержащих термин t; N – множество всех документов).

Характеристика $tf - idf_{t,d}$ при своей простоте обеспечивает хорошее качество поиска. Не-

достатком такого метода является то, что в нем недооцениваются длинные документы из-за содержания в них большого количества слов. Для решения такой проблемы в данной статье используется другая формула вычисления TF-IDF веса:

$$TF - IDF = \\ = TFfactor * IDFfactor * NormalizationFactor, \quad (4)$$

где $TFfactor = 1 + \ln(1 + \ln(tf_{t,d}))$ ($TFfactor = 0$ в случае $tf_{t,d} = 0$)

$$IDFfactor = \log\left(\frac{N+1}{df_t}\right)$$ и $NormalizationFactor =$

$$= \frac{1}{0{,}8 + 0{,}2 \cdot \frac{длина\ документа\ (в\ байтах)}{средняя\ длина\ документа\ (в\ байтах)}}.$$

Обоснованность выбора данной формулы описана в исследованиях [10].

Однако использование формулы (4) приводит к потере информации о порядке следования слов в тексте информационного источника, что нарушает его смысл. Чтобы обойти данную проблему, в работе используется алгоритм отбора устойчивых словосочетаний (пары слов) [2] в тексте документа. Формируется следующий алгоритм обработки запросов:

1. Из запроса выделяется множество всевозможных пар слов (каждая пара сочетает два слова из слов запроса).

2. Из сформированного множества пар с помощью алгоритма, описанного в исследовании [2], отбираются «настоящие» словосочетания, которые добавляются к множеству слов запроса в виде отдельных терминов.

3. Осуществляется поиск и взвешивание документов по формуле (4).

4. Результаты поиска ранжируются по убыванию веса документа.

Данный алгоритм обработки запросов, как показали исследования [2], увеличивает качество информационного поиска.

В статье проверяется качество поиска информации нового алгоритма обхода и выбора дальнейшего пути сканирования Веб-пространства, основанного на совместном использовании алгоритмов HITS и обработки запросов (с учетов их взвешивания по формуле (4)). То есть на каждом шаге получения новых источников информации тематическим Веб-краулером применялся алгоритм взешивания TF-IDF (4), который на множестве всех найденных документов выделяет подмножество Веб-страниц с ненулевыми TF-IDF весами. Далее, для данного подмножества информационных источников применялся алгоритм Клеинберга HITS. Из полученного набора Веб-страниц качественные авторитетные страницы записывались в индекс, а по качественным индексным продолжался поиск новых авторитетных. В результате обхода Веб-пространства по описанному алгоритму тематический Веб-краулер выдает тематическое сообщество [6] авторитетных страниц.

Эксперимент. В эксперименте решалась классическая задача информационного поиска. Оценивались результаты поиска информации созданного авторами тематического Веб-краулера на основе совместного использования алгоритма HITS и алгоритма взвешивания текста документов TF-IDF, полученные после обхода Веб-графа. Производилось сравнение с результатами поиска, которые получились в результате обхода того же графа уже существующими моделями тематических Веб-краулеров, построенных с использованием алгоритмов HITS и TF-IDF по отдельности [1, 3].

Эффективность поиска информации трех реализованных моделей поисковых роботов проверялась в русскоязычной и англоязычной частях Веб-пространства. Для эксперимента были выбраны по пять запросов из тестовых коллекций РОМИП и TREC (табл. 1) [11, 13]. По данным запросам строилось начальное множество гиперссылок в модуле очереди выбранной модели Веб-краулера. Так, например, начальное множество гиперссылок для русскоязычной части Веб-графа строилось следующим образом: каждый запрос из российской тестовой коллекции РОМИП в табл.1 посылался информационно-поисковой системе Google, и выбиралось 10 первых ее результатов. Аналогичным образом строилось стартовое множество гиперссылок и для англоязычной части Веб-пространства на тестовой коллекции TREC. Таким образом, были образованы 10 начальных множеств, с которых запускается каждая из трех созданных моделей тематических Веб-краулеров. Поиск информации каждого Веб-краулера останавливается по истечению 5 итераций (число итераций выбиралось исходя из экономии времени и имеющихся ресурсов).

Результатом работы трех тематических поисковых роботов на выбранных стартовых множествах являются наборы Веб-страниц, образующих тематические сообщества. По данным результатам

Таблица 1

Запросы из тестовых коллекций РОМИП и TREC

№ запроса	Тестовая коллекция РОМИП	Тестовая коллекция TREC
1	Армия России	Art museums
2	Гимн Франции	Solar flares
3	История рентгенологии	International trade
4	Кельтская музыка	Planet Mars
5	Нейтронная бомба	Space exploration

составлялась тестовая коллекция. Производилась экспертная оценка элементов построенной коллекции, т. е. из описаний запросов, полученных из РОМИПа и TREC, независимыми экспертами (группа студентов СПбГУ факультета ПМ-ПУ) выполнялась бинарная классификация каждого элемента тестовой коллекции «релевантен/не релевантен» по отношению к выбранному запросу.

Для оценки эффективности разработанного тематического Веб-краулера на основе совместного использования алгоритма HITS и взвешивания TF-IDF в данном эксперименте использовались наиболее популярные метрики [9, 11, 13]: полнота; точность; R-точность; точность на уровне 5 и 10 документов; средняя точность системы; 11-точечный график полноты/точности, измеренный по методике TREC.

Результаты эксперимента. В каждой модели Веб-краулера выбиралось пятьдесят первых найденных документов по каждому запросу из РОМИПа и TREC. По полученным результатам были составленны тестовые коллекции (табл. 2).

На построенных тестовых коллекциях сначала проверялся тематический Веб-краулер на основе TF-IDF взвешивания. Для него эффективность поиска тестировалась в два этапа: определялось качество поиска для русских и английских тестовых коллекций. По данной модели поискового робота наилучшие результаты в русскоязычных коллекциях были получены по запросу «Нейтронная бомба», средняя точность которого равна 0,45, R-точность – 0,5, точность на уровне пяти первых документов – 0,8, точность на уровне десяти первых документов – 0,9, точность на уровне всех найденных документов за пять итераций Веб-краулера – 0,22 (табл. 3).

В свою очередь, эта же модель Веб-краулера в коллекциях, составленных по запросам из TREC, показала несколько лучший результат поиска информации по сравнению с русскоязычными коллекциями (табл. 3). Так, наилучшие значения метрик были получены по запросу «Planet Mars»: показатель средней точности равен 0,43, R-точности – 0,52, точность на уровне пяти первых документов – 0,8, точность на уровне десяти первых документов – 0,7, точность на уровне всех найденных документов – 0,28.

При оценке значений метрик видно, что тематический поисковый робот на основе TF-IDF взвешивания выполняет поиск в английской тестовой

Таблица 2

Составленные коллекции по запросам из РОМИП и TREC

Запрос	Общее количество документов в коллекции	Количество релевантных документов в коллекции
Армия России	85	10
Гимн Франции	93	20
История рентгенологии	77	14
Кельтская музыка	86	17
Нейтронная бомба	102	20
Art museums	97	19
Solar flares	95	18
International trade	75	16
Planet Mars	109	25
Space exploration	98	18

Таблица 3

Значения метрик по запросам из коллекций TREC и РОМИП для методов поиска тематических сообществ в Веб-пространстве

Тематический Веб-краулер на основе TF-IDF взвешивания					
Метрики	Армия России	Гимн Франции	История рентгенологии	Кельтская музыка	Нейтронная бомба
Кол. рел. док.	3	6	4	2	11
Recall	0,3	0,3	0,29	0,12	0,55
AvgPrec	0,06	0,21	0,12	0,04	0,45
R-precision	0,2	0,3	0,29	0,12	0,5
precision(5)	0	0,6	0,2	0,4	0,8
precision(10)	0,2	0,6	0,4	0,2	0,9
precision(50)	0,06	0,12	0,08	0,04	0,22
	Art museums	Solar flares	International trade	Planet Mars	Space exploration
Кол. рел. док.	5	10	7	14	6
Recall	0,26	0,56	0,44	0,56	0,33
AvgPrec	0,1	0,3	0,24	0,43	0,16
R-precision	0,16	0,56	0,44	0,52	0,28
precision(5)	0,6	0,4	0,4	0,8	0,2
precision(10)	0,3	0,6	0,5	0,7	0,4
precision(50)	0,1	0,2	0,14	0,28	0,12
Тематический Веб-краулер на основе алгоритма HITS					
Метрики	Армия России	Гимн Франции	История рентгенологии	Кельтская музыка	Нейтронная бомба
Кол. рел. док.	5	13	6	11	15
Recall	0,5	0,65	0,43	0,65	0,75
AvgPrec	0,24	0,4	0,17	0,42	0,45
R-precision	0,3	0,5	0,29	0,53	0,55
precision(5)	0,4	0,6	0,2	0,6	0,6
precision(10)	0,3	0,6	0,4	0,8	0,7
precision(50)	0,1	0,26	0,12	0,22	0,3
	Art museums	Solar flares	International trade	Planet Mars	Space exploration
Кол. рел. док.	13	13	10	23	12
Recall	0,68	0,72	0,63	0,92	0,67
AvgPrec	0,26	0,46	0,22	0,49	0,26
R-precision	0,42	0,56	0,13	0,48	0,39
precision(5)	0,0	0,8	0,4	0,4	0,2
precision(10)	0,3	0,6	0,2	0,4	0,3
precision(50)	0,26	0,26	0,2	0,46	0,24
Тематический Веб-краулер на основе совместного использования алгоримов HITS и TF-IDF					
Метрики	Армия России	Гимн Франции	История рентгенологии	Кельтская музыка	Нейтронная бомба
Кол. рел. док.	10	20	14	17	20
Recall	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
AvgPrec	0,59	0,66	0,57	0,73	0,73
R-precision	0,5	0,6	0,5	0,59	0,6
precision(5)	0,6	0,8	0,6	1,0	0,8
precision(10)	0,5	0,7	0,6	0,8	0,8
precision(50)	0,2	0,4	0,28	0,34	0,4
	Art museums	Solar flares	International trade	Planet Mars	Space exploration
Кол. рел. док.	19	18	16	25	18
Recall	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

AvgPrec	0,66	0,67	0,65	0,65	0,57
R-precision	0,63	0,61	0,56	0,6	0,5
precision(5)	0,6	0,8	0,6	1,0	0,8
precision(10)	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5
precision(50)	0,38	0,36	0,32	0,5	0,36

коллекции лучше, чем в русской. В ходе эксперимента было также выявлено, что в обеих коллекциях данная модель краулера находит релевантные документы на уровне 10–20 документов и имеет хорошее значение точности (например, по запросу «Нейтронная бомба» precision(10) = 0,9). На большем уровне найденных документов качество поиска значительно ухудшается. Например, значение точности для первых пятидесяти документов колеблется от 0,06 до 0,28, а значения полноты для некоторых запросов 0,12.

Вторая система поиска информации в Веб-пространстве, которая оценивалась введенными метриками по составленным тестовым коллекциям, основывалась на алгоритме Клеинберга HITS. Для русскоязычного Веб-пространства данная модель тематического Веб-краулера показала лучшие значения метрик по запросам «Кельтская музыка» и «Нейтронная бомба». Показатели всех метрик по каждому запросу из РОМИП подробно представлены в табл. 3.

Для запросов из TREC данный метод поиска информации показал лучшие значения средней точности (равной 0,49) по запросу «Planet Mars». А для запроса «Solar flares» показатели таких метрик как R-точность, точность на уровне пяти первых документов, точность на уровне десяти первых документов, были наивысшими по отношению к другим запросам из англоязычной части Веб-пространства.

Значение полноты и точность модели Веб-краулера на основе алгоритма HITS выше, чем у модели, основанной на TF-IDF взвешивании. Например, в 80 % случаев данная модель на первой позиции своих результатов выдает релевантный документ.

Последними оценивались результаты поиска информации для тематического Веб-краулера, который учитывает как информацию о тексте, найденных документов, так и информацию о гиперссылочной связи между ними. Как и для других моделей поисковых роботов, данная модель проверялась на тестовых коллекциях из запросов РОМИП и TREC. В отличие от предыдущих двух моделей краулеров, данная модель показывала наилучшие показатели по всем метрикам и тестовым коллекциям (табл. 3).

Чтобы получить более подробную информацию об изменении точности в зависимости от требований к полноте, чем единую метрику в виде одной цифры, в эксперименте строился 11-точечный график полноты/точности, измеренный по методике TREC для русской и английской тестовых коллекций (рис. 1, 2).

Графики показывают, что качество поиска информации в Веб-пространстве для поискового робота, основанного на алгоритме HITS и взвешивании TF-IDF, лучше для обоих видов коллекций – график данной модели Веб-краулера находится выше графиков остальных моделей. Для коллекций, составленных из запросов РОМИП и TREC, наблюдается некоторое уменьшение точности, вызванное, скорее всего, флуктуацией. Качество поиска Веб-краулера, основанного на алгоритме Клеинберга, оказалось эффективней, чем поисковый робот, учитывающий только информацию о тексте документа. По всем моделям Веб-краулеров наблюдается наибольший прирост качества поиска при малых значениях полноты. Другими словами, увеличение количества релевантных документов наблюдается в начале выдачи результатов системы, что является полезным качеством с точки зрения пользователя.

Цель данного эксперимента – оценка качества поиска тематического Веб-краулера на основе совместного использования алгоритмов HITS и TF-IDF, сравнив его с моделями Веб-краулеров, построенными с использованием алгоритмов HITS и TF-IDF, по отдельности.

Из поставленного эксперимента можно сделать следующие выводы.

Разработанная модель тематического поискового робота показала наилучшее качество поиска относительно двух других моделей. В рамках поставленного эксперимента значения всех оценок качества информационного поиска для данной модели Веб-краулера были наивысшими.

Тематические Веб-краулеры на основе алгоритма Клеинберга и на основе взвешивания TF-IDF эффективней ищут информацию в тестовых английских коллекциях в то время, как разработанная модель поискового робота обладает примерно одинаковым качеством поиска информации и в русских, и в английских коллекциях.

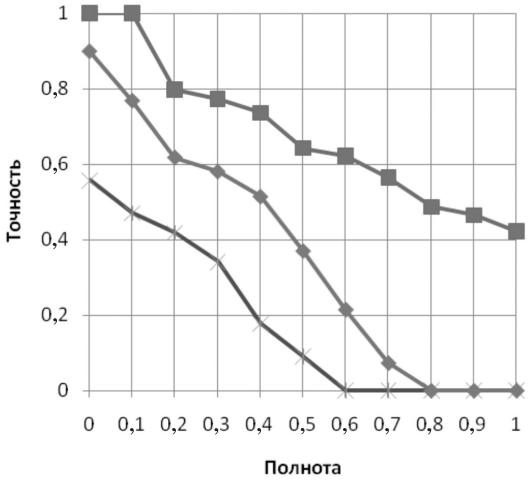


Рис. 1. 11-точечный график полноты/точности по запросам из РОМИП для трех моделей тематических Веб-краулеров

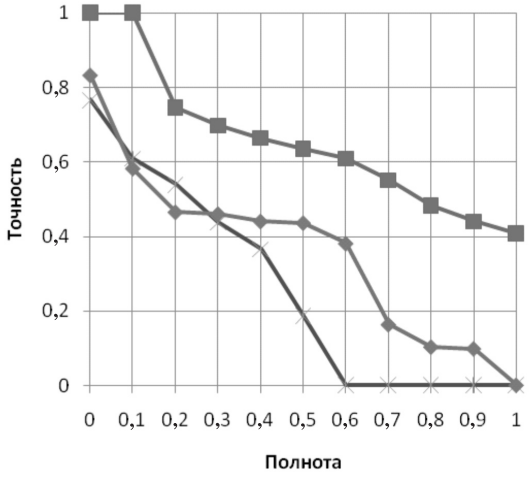


Рис. 2. 11-точечный график полноты/точности по запросам из TREC для трех моделей тематических Веб-краулеров

( ) Веб-краулер на основе TF-IDF; ( ) Веб-краулер на основе HITS;
( ) Веб-краулер на основе алгоритма TF-IDF и HITS взвешивания

Множество объединений релевантных документов, найденных моделью Веб-краулеров на основе алгоритма HITS и моделью на основе взвешивания TF-IDF, является подмножеством множества релевантных документов, найденных разработанной моделью поискового робота. Данный факт говорит о хорошей полноте созданной системы поиска информации в Веб-пространстве.

Как показал эксперимент, качество поиска информации Веб-краулерами на основе TF-IDF взвешивания самое худшее. Данный факт объясняется тем, что содержание большого количества слов запроса в документе не всегда влияет на его релевантность. К таким документам в тестовых коллекциях относились различные форумы, новостные порталы и рекламные Веб-страницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Блеканов, И.С.** Тематический краулинг на основе алгоритма HITS [Текст]/И.С. Блеканов, Д.С. Бондаренко//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2010. –№ 3(101).–С. 111–118.

2. **Губин, М.В.** Исследование качества информационного поиска с использованием пар слов [Текст]/ М.В. Губин//In Труды RCDL-2003.–2003.–С. 186–191.

3. **Некрестьянов, И.С.** Тематико-ориентированные методы информационного поиска [Текст]/И.С. Некрестьянов. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2000.–С. 88.

4. **Arasu, A.** Searching the web [Текст]/A. Arasu, J. Cho, H. Garcia-Molina [et al.]//ACM Transactions on Internet Technology.–Aug. 2001.–Vol. 1.–№ 1.–P. 2–43.

5. **Broder, A.** Graph structure in the Web: Experiments and models [Текст]/A. Broder, R. Kumar, F. Maghoul, [et al.]//In WWW9.–May 2000.–Amsterdam.–Elsevier Science.–Vol. 33.–№1–6.–P. 309–320.

6. **Gibson, D.** Inferring Web communities from link topology [Текст]/D. Gibson, J. Kleinberg, P. Raghavan// Proc. 9th ACM Conf. on Hypertext and Hypermedia.– ACM Press.–NY.–1998.–P. 225–234.

7. **Kahle, B.** Preserving the Internet [Текст]/B. Kahle// Scientific American.–Mar. 1997.–P. 82–83.

8. **Kleinberg, J.** Authoritative sources in a hyperlinked environment [Текст]/J. Kleinberg//Proc. 9th ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms.–1998.–Extended version in Journal of the ACM 46(1999).–ACM Press.–NY.–Vol. 46.–№ 5.–P. 604–632.

9. **Manning, C.** An Introduction to Information Retrieval [Текст]/C. Manning, P. Raghavan, H. Schütze.– Cambridge, England: Cambridge University Press.–Apr. 2009.–P. 544.

10. **Singhal, A.** A case study in web search using trec algorithms [Текст]/A. Singhal, M. Kaszkiel//Proc. of the 10th International Conf. on World Wide Web.–2002.–ACM Press: Hong Kong.–P. 708–716.

11. Российский семинар по Оценке Методов Информационного Поиска [Электронный ресурс].–2003.– Режим доступа: http://romip.ru/, свободный.–Загл. с экрана.

12. Most Reliable Hosting Company Sites [Электронный ресурс].–Режим доступа: http://news.netcraft.com/, свободный.–Загл. с экрана.

13. Text Retrieval Conference (TREC) [Электронный ресурс].–2000.–Режим доступа: http://trec.nist.gov/, свободный.–Загл. с экрана.

УДК 621.391.019

А.Л. Гельгор, Е.А. Попов

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ОГИБАЮЩЕЙ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПИК-ФАКТОР И КОЭФФИЦИЕНТ КОРРЕЛЯЦИИ

Снижение удельных затрат полосы связано с переходом к спектрально-эффективным сигналам [1, 2], использование которых предполагает введение межсимвольной интерференции (МСИ). Для таких сигналов в ряду частных случаев в [3, 4] при небольших значениях глубины МСИ и предельных значениях пик-фактора П и корреляции *K* получены оптимальные формы огибающих.

Цель данной статьи – исследование возможности уменьшения полосы частот при использовании многокомпонентных сигналов с заданными значениями пик-фактора и коэффициента корреляции.

Запишем выражение для *NL*-элементной последовательности *L*-компонентных сигналов с произвольным *M*-элементным сигнальным созвездием, сформированных на несущей частоте f_0 и следующих с периодом *T* символов канального алфавита:

$$y_{LN}(t) = \sum_{p=1}^{L} y_{LN}^{(p)}(t) = \\ = \sum_{p=1}^{L}\sum_{k=0}^{N-1} A_{r_p}^{(k)} a\left(\frac{t-\Delta t_p - kLT}{L}\right)\cos(2\pi f_0 t + \varphi_{r_p}^{(k)}) \\ -LT/2 \le t \le LT/2 + (N-1)LT + (L-1)T, \tag{1}$$

где $a(t)$ – огибающая, определенная на интервале $-T/2 \le t \le T/2$; $A_{r_p}^{(k)}$, $\varphi_{r_p}^{(k)}$ – амплитуда и фаза точки сигнального созвездия, причем индекс $r_p = 1, 2, \ldots, M$ соответствует номеру символа канального алфавита *p*-й компоненты, а индекс $k = 0, 1, \ldots, N-1$ отражает принадлежность к соответствующему тактовому интервалу; Δt_p – величина сдвига начала тактового интервала *p*-й компоненты, обычно выбирается с равномерным шагом: $\Delta t_p = (p-1)T$. В частности, для созвездия ФМ-4: $A_r^{(k)} = A_0$, $\varphi_r^{(k)} = -\pi/4 + r\pi/2$, $r = 1, 2, 3, 4$.

На рис. 1 представлены огибающие компонент 4-компонентного сигнала на *k*-м тактовом интервале 1-й компоненты для огибающей $a(t)$ вида $\cos(x)$, где для сокращения записи введено новое обозначение:

$$a_p^{(k)}(t) = a\left(\frac{t-\Delta t_p - kLT}{L}\right). \tag{2}$$

Пик-фактор колебаний определяется отношением пиковой $P_{\text{п}}$ к средней $P_{\text{ср}}$ мощности:

$$\Pi = \lim_{N\to\infty} \frac{\max\left\{y_{LN}^2(t)\right\}}{\mathrm{E}\left\{\frac{1}{NLT}\int_{-LT/2}^{LT/2+(N-1)LT+(L-1)T} y_{LN}^2(t)dt\right\}}. \tag{3}$$

В силу периодичности (1) найти наибольшее значение числителя (3) достаточно на произвольном интервале времени длительностью *T*. В качестве такого интервала выберем окончание $(k+1)$-го интервала первой компоненты. Такой выбор обусловлен тем, что на этом промежутке времени на всех остальных компонентах также передаются сигналы их $(k+1)$-х тактовых интервалов (рис. 1), и это позволяет упростить запись (например, на *L*-й компоненте в этот момент времени передается начало ее $(k+1)$-го тактового интервала):

$$\max\left\{y_{LN}^2(t)\right\} = \max_{t\in\left[-\frac{LT}{2}+(L-1)T+kLT;\frac{LT}{2}+kLT\right]} \times \\ \times\left\{\left(\sum_{p=1}^{L} A_{r_p}^{(k)} a_p^{(k)}\cos(2\pi f_0 t + \varphi_{r_p}^{(k)})\right)^2\right\}.$$

Можно показать, что

$$y_{LN}^2(t)\Big|_{t\in\left[-\frac{LT}{2}+(L-1)T+kLT;\frac{LT}{2}+kLT\right]} = \\ = \left(\sum_{p=1}^{L}\sum_{d=1}^{L} A_{r_p}^{(k)} A_{r_d}^{(k)} a_p^{(k)}(t) a_d^{(k)}(t)\cos\left(\varphi_{r_p}^{(k)} - \varphi_{r_d}^{(k)}\right)\right)\times \\ \times\cos^2(2\pi f_0 t). \tag{4}$$

В знаменателе (2) также достаточно рассмотреть математическое ожидание на произвольном интервале времени длительностью T:

$$\mathrm{E}\left\{\frac{1}{NLT}\int_{-LT/2}^{LT/2+(N-1)LT+(L-1)T} y_{LN}^2(t)dt\right\} = \mathrm{E}\left\{\frac{1}{T}\int_{-LT/2+(L-1)T+kLT}^{LT/2+kLT} y_{LN}^2(t)dt\right\}.$$

Для квадратурной амплитудной манипуляции (КАМ) получим:

$$\mathrm{E}\left\{\frac{1}{T}\int_{-LT/2+(L-1)T+kLT}^{LT/2+kLT} y_{LN}^2(t)dt\right\} = \frac{L}{2T}\frac{\sqrt{M}+1}{3(\sqrt{M}-1)}\int_{T/2}^{T/2} a^2(t)dt. \quad (5)$$

Используя (4) при $k = 0$ и (5), получим выражение для вычисления пик-фактора L-компонентных сигналов с КАМ:

$$\Pi = \frac{2T}{L}\frac{3(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}+1}\frac{\max\limits_{t\in\left[-\frac{LT}{2}+(L-1)T;\frac{LT}{2}\right]}\left\{\sum\limits_{p=1}^{L}\sum\limits_{d=1}^{L}A_{r_p}A_{r_d}a\left(\frac{t-\Delta t_p}{L}\right)a\left(\frac{t-\Delta t_d}{L}\right)\cos(\varphi_{r_p}-\varphi_{r_d})\right\}}{\int_{T/2}^{T/2}a^2(t)dt}. \quad (6)$$

Для случая амплитудно-фазовой манипуляции (АФМ) в (6) достаточно заменить $\sqrt{M}$ на M. Обратим внимание, что если в каждой компоненте используется одинаковая КАМ, то (6) значительно упрощается:

$$\Pi = \frac{2T}{L}\frac{3(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}+1}\frac{\max\limits_{t\in\left[-\frac{LT}{2}+(L-1)T;\frac{LT}{2}\right]}\left\{\left(\sum\limits_{p=1}^{L}\left|a\left(\frac{t-\Delta t_p}{L}\right)\right|\right)^2\right\}}{\int_{T/2}^{T/2}a^2(t)dt}. \quad (7)$$

Для АФМ (7) использовать нельзя.

Можно показать, что энергетический спектр многокомпонентного сигнала (1) в области $\omega > 0$ определяется так

$$G(\omega-\omega_0) = \frac{L}{4T}\frac{\sqrt{M}+1}{3(\sqrt{M}-1)}\left|F_a^{(L)}(\omega-\omega_0)\right|^2 = \frac{L^3}{4T}\frac{\sqrt{M}+1}{3(\sqrt{M}-1)}\left|F_a(L(\omega-\omega_0))\right|^2, \quad (8)$$

где

$$F_a^{(L)}(\omega-\omega_0) = L\int_{-T/2}^{T/2}a(t)\exp(-j(\omega-\omega_0)Lt)dt = LF_a(L(\omega-\omega_0)), \quad (9)$$

и аналогичный вид энергетический спектр имеет в области $\omega < 0$.

Решение задачи оптимизации формы огибающей многокомпонентных сигналов заключается в решении (минимизации) функционала:

$$J = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega)G(\omega)d\omega, \quad (10)$$

где

$$g(\omega) = \omega^{2n} \quad (11)$$

и n – произвольное целое.

В [5] показано, что спектр последовательности сигналов в области внеполосных излучений будет убывать не медленнее, чем C/ω^{n+1}, если все производные огибающей $a(t)$ вплоть до производной $(n-1)$-го порядка $a^{(n-1)}(t)$ не имеют скачков, а $a^{(n)}(t)$ всюду конечна. В случае разложения огибающей $a(t)$ в ряд ограниченных функций данное условие вырождается в граничные условия вида

$$a^{(k)}(t)\big|_{t=\pm T/2} = 0,\ k = 0, 1, ..., n-1. \quad (12)$$

При минимизации функционала J будем ограничивать скорость спада спектра значением $\gamma = n + 1$, что достаточно для сходимости интеграла в (10).

Без потери общности можно положить:

$$E_0 = \int_{-T/2}^{T/2}a^2(t)dt = 1. \quad (13)$$

Условие на коэффициент корреляции связано с необходимостью обеспечить требуемое минимальное евклидово расстояние $\Delta E_{\min}$ для получения приемлемой помехоустойчивости и, в предельном случае при $K = 0$ – существенного упрощения алгоритма приема. Для исследуе-

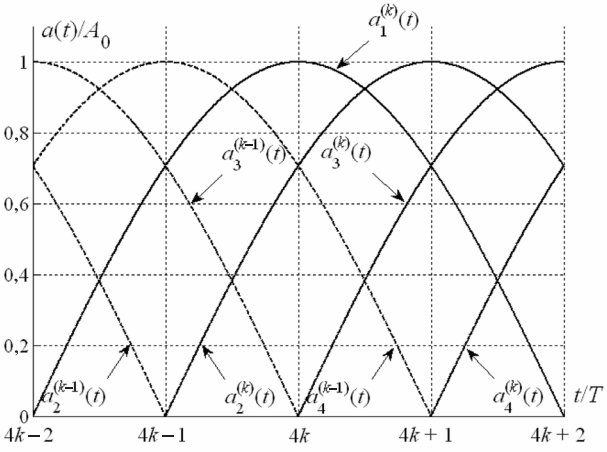


Рис. 1. Огибающие (2) для $L = 4$ и $a(t)$ вида $\cos(x)$

мых многокомпонентных сигналов достаточно рассматривать, например, коэффициенты корреляции первой компоненты на ее k-м тактовом интервале со всеми остальными компонентами. Понятно, что у всех остальных компонент на k-м тактовом интервале первой компоненты заканчивается свой ($k-1$)-й и начинается k-й тактовый интервал (рис. 1). Тогда коэффициент корреляции первой и p-й компонент на k-м тактовом интервале первой компоненты можно представить следующим образом:

$$K_{1p}^{(k)} = \int_{-LT/2+kLT}^{-LT/2+kLT+\Delta t_p} A_{r_1}^{(k)} a_1^{(k)}(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi_{r_1}^{(k)})\times$$
$$\times A_{r_p}^{(k-1)} a_p^{(k-1)}(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi_{r_p}^{(k-1)})dt +$$
$$+\int_{-LT/2+kLT+\Delta t_p}^{LT/2+kLT} A_{r_1}^{(k)} a_1^{(k)}(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi_{r_1}^{(k)})\times$$
$$\times A_{r_p}^{(k)} a_p^{(k)}(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi_{r_p}^{(k)})dt .$$

Нетрудно показать, что

$$\max\left\{\left|K_{1p}^{(k)}\right|\right\} \le \frac{L}{2}\left|\int_{-T/2+kT}^{-T/2+kT+\Delta t_p/L} a_1^{(k)}(Lt)a_p^{(k-1)}(Lt)dt\right| +$$
$$+\frac{L}{2}\left|\int_{-T/2+kT+\Delta t_p/L}^{T/2+kT} a_1^{(k)}(Lt)a_p^{(k)}(Lt)dt\right|, \quad (14)$$

где максимум вычисляется по всем возможным значениям A и φ. В силу независимости слагаемых в (14) их можно рассматривать отдельно. Обратим внимание, что при вычислении максимальной суммарной корреляции первой компоненты

$$\max\left\{|K|\right\} = \max\left\{\left|K_1^{(k)}\right|\right\} \le \sum_{p=2}^{L}\max\left\{\left|K_{1p}^{(k)}\right|\right\} \quad (15)$$

в правой части (15) будет только ($L-1$) различных слагаемых из имеющихся $2(L-1)$. Для нормировки логично разделить коэффициент корреляции на максимальную энергию тактового интервала одной огибающей:

$$\max\left\{\int_{-LT/2+kLT+\Delta t_p}^{LT/2+kLT+\Delta t_p}\left(A_{r_p}^{(k)} a_p^{(k)}\cos(2\pi f_0 t + \varphi_{r_p}^{(k)})\right)^2 dt\right\} =$$
$$= LE_0/2 = L/2 .$$

Ограничение корреляции для L-компонентного сигнала заданным значением κ можно записать в виде системы $2(L-1)$ неравенств:

$$\left|\int_{-T/2+\Delta t_p/L}^{T/2} a(t)a(t-\Delta t_p/L)dt\right| \le \frac{\kappa}{2(L-1)}, \quad (16)$$
$$p = 2, 3, \ldots, L.$$

Рассмотрим численный метод решения функционала J, основанный на представлении огибающей в виде ортогонального разложения Фурье. В силу симметричности задачи решение будем искать в классе четных на интервале $[-T/2, T/2]$ функций:

$$a(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right). \quad (17)$$

Решения, полученные численными методами, всегда являются неточными. В данном случае погрешность возникает уже при рассмотрении конечного числа m членов ряда Фурье. Также, например, условие на заданную величину пик-фактора ρ не может быть описано в виде конечного числа уравнений, т. к. (6) включает в себя перебор всех значений $-LT/2 + (L-1)T \le t \le LT/2$. Взамен этого можно рассмотреть (6) для нескольких значений t из указанного интервала. Понятно, что чем больше количество рассматриваемых значений, тем точнее будет ограничен пик-фактор. С другой стороны, при учете конечного числа m и наличии условия (13), скорость изменения искомой огибающей оказывается ограниченной и, следовательно, учет даже небольшого числа значений t оказывается достаточным, чтобы получить приемлемый результат. В данной статье для ограничения пик-фактора будем рассматривать $P = 16$ моментов времени t_i:

$$t_i = -LT/2 + (L-1)T + iT/P,\ i = 1, 2, 3, \ldots, P. \quad (18)$$

Тогда с учетом (13) ограничение пик-фактора значением ρ можно записать в виде системы нелинейных неравенств:

$$\frac{2T}{L}\frac{3(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}+1}\max\left\{\sum_{p=1}^{L}\sum_{d=1}^{L} A_{r_p}A_{r_d}\, a\left(\frac{t_i-\Delta t_p}{L}\right)\times\right.$$
$$\left.\times\, a\left(\frac{t_i-\Delta t_d}{L}\right)\cos(\varphi_{r_p}-\varphi_{r_d})\right\} \le \rho , \quad (19)$$

где $i = 1, 2, \ldots, 16$, а максимум также вычисляется по всем возможным значениям A и φ.

Подставляя (17) в (11) имеем:

$$J = (-1)^n \int_{-T/2}^{+T/2}\left(\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)\right)\frac{d^{(2n)}}{dt^{(2n)}}\times$$
$$\times\left(\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)\right)dt .$$

Производя несложные преобразования, можно показать, что

$$J = \frac{T}{2}\sum_{k=1}^{\infty} a_k^2\left(\frac{2\pi}{T}k\right)^{2n}. \quad (20)$$

Подставляя (17) в (13), аналогично получим:

$$E_0 = \int_{-T/2}^{T/2}\left(\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)\right)^2 \times$$
$$\times dt = \frac{T}{2}\left(\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k^2\right) = 1. \quad (21)$$

Рассмотрим граничные условия (12). Обратим внимание на то, что при подстановке (17) для всех производных нечетного порядка

$$a^{(b)}(t/L)\Big|_{t=\pm LT/2} = \sum_{k=1}^{\infty} a_k (-1)^{\frac{b+1}{2}} \times$$

$$\times \left(\frac{2\pi}{LT}k\right)^b \sin\left(\frac{2\pi}{LT}kt\right)\Bigg|_{t=\pm LT/2} = 0\,,\ b - \text{нечетное},$$

т. е. половина граничных условий оказывается выполненной всегда. Таким образом, для четных функций, разложенных в ряд Фурье, верно следующее утверждение: если выполнены условия для скорости спада спектра не хуже, чем $C/\omega^{(b+1)}$ и $(b+1)$ – четное, то выполнены условия для скорости спада не хуже, чем $C/\omega^{(b+2)}$, т. е. граничные условия оказываются одинаковыми для $n = b + 1$ и $n = b + 2$.

Рассмотрим теперь производные четного порядка. Для них значения производной на границах тактового интервала совпадают, поэтому достаточно рассматривать лишь одну границу, например, $+LT/2$:

$$a^{(b)}(t/L)\Big|_{t=\pm LT/2} = \sum_{k=1}^{\infty} a_k (-1)^{\frac{b}{2}} \left(\frac{2\pi}{LT}k\right)^b \times$$

$$\times \cos\left(\frac{2\pi}{LT}kt\right)\Bigg|_{t=\pm LT/2},\ b - \text{четное}.$$

Таким образом, граничные условия (12) при подстановке (17) можно записать так:

$$\frac{a_0}{2}(1-\operatorname{sign}(b)) + \sum_{k=1}^{\infty} a_k (-1)^{k+\frac{b}{2}} \left(\frac{2\pi}{LT}k\right)^b = 0, \quad (22)$$

$$0 \le b \le n-1,\ b - \text{четное},$$

где

$$\operatorname{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -1, & x < 0. \end{cases}$$

Вариационная изопериметрическая задача с дополнительными граничными условиями преобразуется в задачу поиска минимума функции многих переменных (20) при наличии дополнительных уравнений связи (21), (22), (16) и (19).

При решении оптимизационных задач будем считать минимальным значением пик-фактора $\rho = 2{,}01$, а минимальным коэффициентом корреляции, достаточным для минимизации МСИ, значение $\kappa = 0{,}01$. С одной стороны, такое упрощение позволит разумно ограничить число m, а, с другой, – проигрыш в энергетической эффективности, например, по отношению к сигналам с пик-фактором 2,00 составит 0,02 дБ, т. е. будет незначительным.

Также, учитывая, влияние значения m на точность получаемого результата, необходимо определить правило выбора m, обеспечивающего приемлемое решение оптимизационной задачи. Обозначим коэффициенты решения для m как последовательность $\left\{a_k^{(m)}\right\}$, $k = 0, 1, 2, \ldots, m$, и рассмотрим квадрат среднеквадратического отклонения решений $\left\{a_k^{(m)}\right\}$ и $\left\{a_k^{(m+1)}\right\}$:

$$\sigma^2_{m,m+1} = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}\left[\left(\frac{a_0^{(m)}}{2} + \sum_{k=1}^{m} a_k^{(m)} \cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)\right) - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{a_0^{(m+1)}}{2} + \sum_{k=1}^{m+1} a_k^{(m+1)} \cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)\right)\right]^2 dt\,.$$

После ряда несложных преобразований, а также, формально добавив в решение $\left\{a_k^{(m)}\right\}$ коэффициент $a_{m+1}^{(m)} = 0$, который не изменяет решение, можно получить:

$$\sigma^2_{m,m+1} = \frac{1}{4}\left(a_0^{(m)} - a_0^{(m+1)}\right)^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m+1}\left(a_k^{(m)} - a_k^{(m+1)}\right)^2.$$

Будем считать, что решение $\left\{a_k^{(m)}\right\}$ обеспечивает необходимую точность, если $\sigma_{m,\,m+1} \le 0{,}001$.

Полученные результаты решений оптимизационных задач представлены в таблице, где в первом столбце указывается порядковый номер оптимизационной задачи, во втором столбце – вид манипуляции (АФМ или КАМ); L, ρ и κ – это параметры оптимизационной задачи, а остальные значения – параметры решения. Все задачи решены для скорости спада спектра $n = 2$. Значения полосы частот решений рассчитываются по двум критериям: 99 % концентрации энергии в полосе $\Delta F_{99\,\%}$ и по уровню внеполосных излучений – 60 дБ $\Delta F_{-60\,\text{дБ}}$. Пик-фактор вычисляется для $M = 2$ в случае АФМ и $M = 4$ в случае КАМ. Рассмотрение АФМ необходимо при минимизации пик-фактора, т. к. позволяет получить лучшие результаты, чем для КАМ, при этом в четных компонентах используются АФМ-созвездия, повернутые на угол $\alpha = \pi/2$ по отношению к созвездиям нечетных компонент.

Из анализа представленных в таблице результатов решений оптимизационных задач можно сделать следующие выводы.

Найдены граничные значения глубины межсимвольной интерференции ($L_{\text{гр}}$) до которых еще происходит сокращение полосы частот последовательности многокомпонентных сигналов при заданных значениях пик-фактора и величины кор-

Результаты решений оптимизационных задач

№	Созв.	L	ρ	κ	m	ρ*	κ*	$\Delta F_{99\,\%}$	$\Delta F_{-60\,\text{дБ}}$
1	АФМ	2	2,01	-	6	2,01	-	1,34	7,72
2	АФМ	4	2,01	0,01	12	2,01	0,01	1,11	4,72
3	АФМ	8	2,01	0,01	18	2,01	0,01	1,13	4,31
4	АФМ	2	2,01	-	6	2,01	-	1,34	7,72
5	АФМ	2	2,10	-	6	2,10	-	1,33	7,70
6	АФМ	2	2,20	-	6	2,20	-	1,32	7,68
7	АФМ	2	2,30	-	4	2,30	-	1,33	7,61
8	АФМ	4	2,01	-	12	2,01	0,00	1,11	4,72
9	АФМ	4	2,10	-	9	2,10	0,05	0,95	3,26
10	АФМ	4	2,20	-	9	2,20	0,10	0,89	2,82
11	АФМ	4	2,30	-	7	2,30	0,15	0,84	2,69
12	АФМ	4	-	0,01	7	2,22	0,01	0,92	4,31
13	АФМ	4	-	0,10	7	2,32	0,10	0,86	3,82
14	АФМ	4	-	0,20	6	2,46	0,20	0,80	2,64
15	АФМ	4	-	0,30	4	2,61	0,30	0,73	2,86
16	АФМ	8	2,01	-	18	2,01	0,00	1,13	4,30
17	АФМ	8	2,10	-	18	2,10	0,05	0,95	3,24
18	АФМ	8	2,20	-	11	2,20	0,10	0,89	2,66
19	АФМ	8	2,30	-	11	2,30	0,15	0,84	2,76
20	АФМ	8	-	0,01	9	3,40	0,01	0,67	2,68
21	АФМ	8	-	0,10	9	3,46	0,10	0,64	2,43
22	АФМ	8	-	0,20	7	3,59	0,21	0,61	1,88
23	АФМ	8	-	0,30	5	3,89	0,31	0,59	2,16
24	КАМ	1	-	-	4	2,52	-	2,71	13,47
25	КАМ	2	-	0,01	7	3,46	0,01	1,85	8,63
26	КАМ	4	-	0,01	11	3,87	0,01	1,33	5,86
27	КАМ	8	-	0,01	15	5,42	0,01	1,13	4,39
28	КАМ	16	-	0,01	20	9,00	0,01	1,04	2,96

реляции. В частности, для ρ = 2,01 и κ = 0,01, как следует из результатов задач 1–3 и рис. 2, $L_{\text{гр}} = 4$.

Увеличение значения заданного коэффициента корреляции κ = 0,01 до κ = 0,3 (задачи 12, 15) приводит к уменьшению $\Delta F_{99\,\%}$ в 1,3 раза.

При отсутствии ограничений на величину пик-фактора колебаний и сохранении ограничений на коэффициент корреляции увеличение L, хотя и приводит к сужению полосы частот, тем не менее, скорость ее уменьшения сильно замедляется. Так, при увеличении числа компонент с $L = 1$ до $L = 2$ (задачи 24, 25) полоса частот $\Delta F_{99\,\%}$ уменьшается в 1,5 раза, а при увеличении числа компонент с $L = 8$ до $L = 16$ (задачи 27, 28) – только в 1,1 раза (рис. 3).

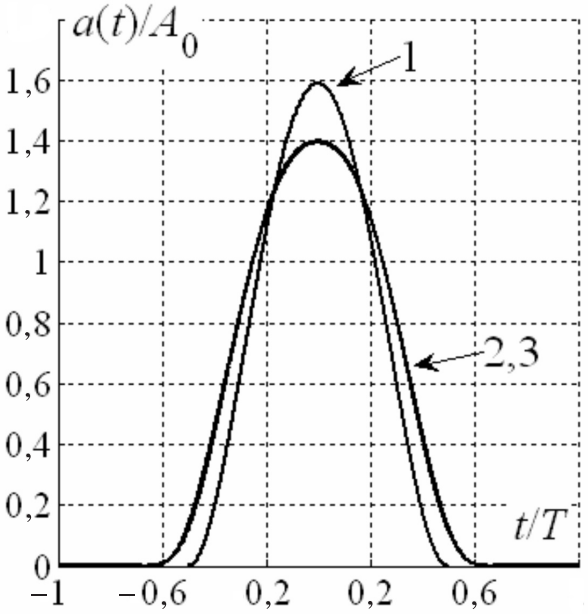


Рис. 2. Форма огибающей как решение задач 1, 2 и 3

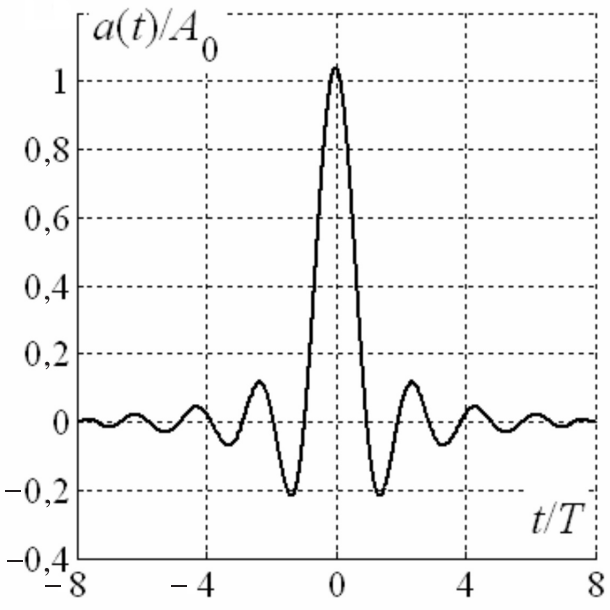


Рис. 3. Форма огибающей как решение задачи 28

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гельгор, А.Л.** Спектральная и энергетическая эффективности многопозиционных зависимых сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией [Текст]/А.Л. Гельгор, Е.А. Попов//Радиотехника. –2008. –№ 12.–С. 4–9.

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

3. **Вальдман, Д.Г.** Синтез спектрально-эффективных сигналов с заданными частотно-временными характеристиками для систем связи [Текст]/Д.Г. Вальдман, С.Б. Макаров, В.И. Теаро//Техника радиосвязи.–1997.–Вып. 3.–С. 22–33.

4. **Сюэ, Вэй** Синтез спектрально-эффективных сигналов для защищенных беспроводных телекоммуникационных систем с ограниченным энергетическим ресурсом [Текст]/Вэй Сюэ, С.Б. Макаров//Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы.–2006.–№ 2.–С. 83–94.

5. **Гуревич, М.С.** Спектры радиосигналов [Текст]/М.С. Гуревич.–М.: Связьиздат, 1963.

УДК [621.396.4:621.3.018:621.391.883.2]-047.44

М.В. Иванов

АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ПОМЕХ В ОБРАТНОМ КАНАЛЕ В СЕТЯХ WCDMA И МЕТОДЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Сети мобильной связи с кодовым разделением каналов WCDMA являются интерференционно-ограниченными: уровень интерференции определяет пропускную способность сети. Общая интерференционная картина в секторе сети WCDMA включает несколько составляющих:

собственные тепловые шумы приемника базовой станции;

внешняя интерференция от различных источников;

внутренняя интерференция, зависящая от абонентской нагрузки в секторе и от конфигурации радиосети.

Собственные тепловые шумы приемника – характеристика оборудования базовой станции. Современное оборудование имеет хорошие показатели по внутренним тепловым шумам, которые находятся в пределах 1,5…3 ДБ [1].

Внесистемная составляющая интерференционной картины сектора, как правило, связана с работой радиоэлектронных средств, медицинской аппаратуры или иного технологического оборудования в той же или близлежащей полосе частот. В этом случае проводятся мероприятия, связанные с нормативно-правовым регулированием использования полосы частот или изменением частот и углов направления излучения антенн базовой станции.

Внутрисистемная интерференция, вызванная некорректной конфигурацией радиоподсистемы, является той составляющей, которую оператор имеет возможность минимизировать с помощью оптимизационных мероприятий. Основные задачи данной статьи – анализ влияния внутрисистемной интерференции на емкость сектора и разработка метода оптимизации сети, результатом которого является минимизация данного слагаемого в общей интерференционной картине сектора.

На практике, для оценки уровня общей интерференционной картины в секторе сети WCDMA применяется параметр RTWP (Receive Total Wideband Power – суммарная принимаемая мощность в рабочей полосе частот). RTWP является суммой всех принимаемых приемником базовой станции сигналов, включая полезные сигналы от мобильных терминалов, обслуживаемых сектором, интерференционные помехи, создаваемые мобильными терминалами соседних секторов, тепловой шум и вероятные внешние помехи [2]. Уровень интерференции в секторе (RTWP) равен:

$$\mathrm{RTWP} = (N_{\mathrm{th}} + N_f) + \mathrm{ROT} + (N_{\mathrm{noise}} + N_{\mathrm{addition}}), \quad (1)$$

где N_{th} – спектральная плотность теплового шума

$$N_{\mathrm{th}} = 10\log(\mathrm{K} \times \mathrm{T} \times \mathrm{W}). \quad (2)$$

При ширине спектра W = 3,84 МГц, K = $1{,}38*10^{-23}$ДЖ/К (постоянная Больцмана) и T = 290 К, спектральная мощность теплового шума равна 108 ДБм/3,84 МГц. В формуле (1) N_f – собственные шумы приемника базовой станции; N_{noise} – мощность внесистемной помехи; N_{addition} – мощность дополнительной внутрисистемной помехи; ROT (Rise Of Thermal) – интерференция, вызванная абонентской нагрузкой в секторе.

Основная проблема при высоком уровне интерференции – сокращение радиуса обслуживания сектора вплоть до самоблокировки соты, когда радиус зоны обслуживания сектора R→0. В связи с этим контроль и минимизация интерференции в секторах сети WCDMA – важная составляющая оптимизации радиосети.

Внесистемные помехи, увеличивающие уровень интерференции в секторе, подробно в статье не рассматриваются. Некорректная конфигурация радиоподсистемы, вызывающая увеличение внутрисистемной интерференции, связана с отсутствием описания хэндоверов между соседними секторами, имеющими пересекающиеся зоны обслуживания. Такая ситуация возможна в условиях города, где наблюдается высокая плотность установки базовых станций. При этом такие показатели качества работы сети, как успешность хэндоверов или процент обрывов соединений, не позволяют обнаружить проблему. Мобильный терминал либо совершает хэндовер на более удаленный сектор сети WCDMA, либо происходит межсистемный хэндовер в сеть GERAN.

В случае описанного хэндовера, если мобильный терминал перемещается из зоны обслуживания сектора 1 в зону обслуживания сектора 2, то приближаясь к границе сектора 1, он переходит в режим «soft handover», в котором обслуживание происходит одновременно двумя секторами. При этом система автоматической регулировки мощности ориентируется на сектор с лучшим качеством принимаемого сигнала и, тем самым, минимизирует внутрисистемную интерференцию.

При неописанном хэндовере мобильный терминал, находящийся в режиме «connected mode», не может совершить хэндовер на соту с лучшим качеством сигнала и работает с повышенной мощностью, что приводит к росту интерференции в сети.

Рассмотрим влияние неописанного хэндовера на интерференцию в секторе на примере голосового сервиса AMR 12,2 кбит/с (Adaptive Multi Rate – речевой кодек с адаптивной скоростью) в условиях городской застройки. Результаты расчета радиуса зоны обслуживания приведены в табл.1.

При расчете использовалась модель канала TU3, когда абонент перемещается со скоростью 3 км/ч в условиях городской застройки. Модель

Таблица 1

Расчет радиуса зоны обслуживания по обратному каналу

Параметры расчета	Значения	Комментарии
Общие параметры		
Сервис	CS AMR12,2	
Модель канала	TU3	
Модель распространения	Модель Кся-Бертони	
Параметры UE		
Максимальная мощность UE, ДБм	24	*a*
Потери в кабеле UE, ДБ	0	*b*
Потери в теле человека, ДБ	3	*c*
Усиление антенны UE, ДБ	0	*d*
EIRP (Эквивалентная изотропная излучаемая мощность), ДБм	21	$e = a - b - c + d$
Параметры NodeB		
Усиление антенны NodeB, ДБ	18	*F*
Потери в кабеле NodeB, ДБ	3,3	*G*
Шумовая картина NodeB, ДБ	5,3	$i = g + 2$
Требуемое отношение Eb/No для выбранного сервиса, ДБ	2,8	*j*
Чувствительность приемника NodeB, ДБм	–124,9	$k = j+(-108+i) -10\log(3840/12,2)$
Загрузка сектора, %	50	L
Увеличение уровня RTWP, связанное с загрузкой сектора, ДБм	3	$m = -10\log(1-l)$
Выигрыш при использовании SHO, ДБ	1,5	*n*
Минимальный уровень сигнала, необходимый для его демодуляции, ДБм	–141,4	$o = k - f + m - n$
Параметры модели распространения		
Запас на быстрые замирания, ДБ	3	*P*
Запас на медленные замирания, ДБ	8	*R*
Потери на проникновение, ДБ	0	*S*
Допустимые потери на трассе распространения, ДБ	151,4	$t = e - o - p - r - s$

определяет запасы на быстрые и медленные замирания сигнала, которые равны 8 и 3 ДБ соответственно при условии 95 % вероятности покрытия зоны обслуживания соты [3]. Для рассматриваемого случая примем, что абонент находится на улице, поэтому потери на проникновение в зданиях равны нулю. Максимальная мощность мобильного терминала равна 24 ДБм, что соответствует классу мощности 3. Значения усиления приемной антенны NodeB, потерь в антенно-фидерном тракте и шумовой картины приемника соответствуют характеристикам реального оборудования. Выигрыш от использования SHO (Soft HandOver – мягкий хэндовер) в режиме макроразнесения на приемной стороне выбран равным 1,5 ДБ. В процессе анализа учитывалась нагрузка в секторе, равная 50 %.

Оценка баланса потерь показывает, что радиус соты для сервиса CS AMR12,2 составит 550 м. Расстояние между сотами $d1$ составляет 1100 м (рис. 1). Как правило, зоны SHO составляют примерно 30 % от общей зоны обслуживания ($d3$), поэтому будем считать, что расстояние между соседними NodeB $d1$=1100 м*0,3=770 м.

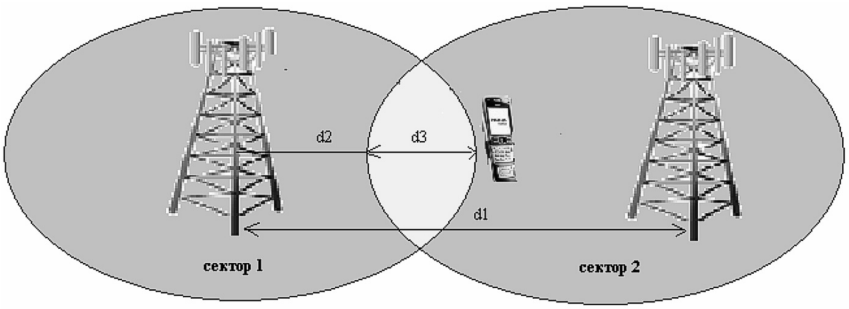


Рис. 1. Модель для расчета влияния неописанных хэндоверов на интерференционную картину сектора

Зная максимальную дальность связи $d2 = 550$ м, определим, на каком расстоянии может находиться мобильный терминал относительно сектора 2, с которым не описан хэндовер $d1 - d2 = 220$ м. Используя данные для расчета максимальной дальности связи для сервиса CS AMR12,2 можно рассчитать мощность сигнала на входе приемника NodeB сектора 2, который является для него внутрисистемной помехой.

Как следует из табл. 2, для сектора 2 уровень внутрисистемной интерференции будет равен –103,9 ДБ.

Сравним расчетные данные с экспериментальными. Эксперимент проводился на фрагменте сети WCDMA. Тестовый мобильный терминал, работающий в сети WCDMA и поддерживающий сервис CS AMR12.2, находился в зоне обслуживания сектора 1. Между тестовыми секторами WCDMA был описан хэндовер, однако, с помощью инженерного меню NetMonitor, установив заданную частоту и скремблирующий код, можно воспроизвести ситуацию, когда мобильный терминал не будет переходить в другие сектора сети. По мере удаления от обслуживающего сектора мощность мобильного терминала возрастала до максимальной 24 ДБм. Расстояние до сектора 2 составило 200 м, что сравнимо с данными теоретического расчета. Результаты теоретического расчета и эксперимента представлены в табл. 3.

Экспериментальное значение RTWP в нормальном режиме работы выше расчетного, т. к. сектор не изолирован от внешнего влияния. Увеличение уровня интерференции согласно расчету составляет 2,1 ДБ. По результатам эксперимента неописанный хэндовер повлек увеличение максимального уровня интерференции на 2,5 ДБ. Увеличение уровня RTWP на 2,5 ДБ соответствует увеличению уровня мощностной нагрузки в секторе примерно на 20…25 % [4]. В том случае, когда хэндоверы описаны корректно, один абонент CS AMR12,2 занимает около 3 % мощностного ресурса в UL. Полученные данные наглядно отражают негативное влияние неописанных хэндоверов между секторами сети WCDMA на емкость сети и качество обслуживания абонентов. В реальных условиях при неописанном хэндовере количество мобильных терминалов, работающих с повышенной мощностью, может быть больше одного, поэтому уровни интерференции как в одном, так и в другом секторах могут значительно превышать полученные результаты.

Для поиска и устранения неописанных хэндоверов проводятся драйв-тесты, по результатам которых определяются хэндоверы, необходимые

Таблица 2

Расчет уровня внутрисистемной интерференции

Параметры расчета	Значения	Комментарии
Потери на трассе распространения, ДБ	137,6	*a*
EIRP (Эквивалентная изотропная излучаемая мощность), ДБм	21	*b*
Усиление антенны NodeB, ДБ	18	*c*
Потери в кабеле NodeB, ДБ	3,3	*d*
Шумовая картина NodeB, ДБ	5,3	$e = d+2$
Мощность на входе приемника NodeB сектора 2, ДБ	–103,9	$f = b-a+c-e$

Таблица 3

Сравнение расчетных и экспериментальных значений уровней RTWP

Значения	Максимальное значение RTWP при описанном хэндовере, ДБм	Максимальное значение RTWP при неописанном хэндовере, ДБм
Теоретический расчет	–106	–103,9
Эксперимент	–105,7	–103,2

для коррекции параметров сети. Данный вариант подходит для обнаружения неописанных хэндоверов в частных случаях, когда повышенный уровень интерференции уже обнаружен для конкретного сектора. Недостаток данного метода очевиден – высокие трудозатраты на проведение драйв-тестов. В связи с этим предлагается иной метод, позволяющий удаленно определять необходимые соседские отношения как для конкретного сектора, так и для фрагмента сети WCDMA.

Рассмотрим пример обнаружения неописанного хэндовера в сети, построенной на базе оборудования компании Huawei. У данного производителя в системе управления радиосетью предусмотрена возможность просмотра трейсов в реальном времени, которые включают в себя все сообщения уровня RRC (Radio Resource Control – уровень управления радиоресурсами). Сигнальные сообщения уровня RRC собираются для всех активных абонентов данного сектора. Мобильные терминалы измеряют уровни сигналов сот вне зависимости от конфигурации сети (максимум для 32 сот) и отсылают данную информацию на RNC (Radio Network Controller – контроллер радиосети) в сообщении «RRC measurement control». Пример данного сообщения представлен на рис. 2. В сообщении содержится информация о скремблирующем коде канала PCPICH (Physical Common Pilot Channel), уровнях RSCP (Receive Signal Code Power, уровень принимаемого сигнала) и Ec/No (отношение сигнал/шум) для соседнего сектора. Уровни RSCP и Ec/No передаются в закодированном виде.

Собрав статистику по данным сообщениям и исключив сектора, с которыми хэндоверы уже описаны, можно получить список секторов-претендентов на описание хэндоверов. Для того чтобы исключить случайные единичные попадания соседних секторов в список кандидатов, необходимо задаться минимальным количеством попаданий сектора в список кандидатов за период сбора трейса. Дополнительным условием для добавления хэндовера в конфигурацию сети является превышение уровнями RCSP и Ec/No заданных порогов. В городских условиях уровень RSCP > –90 ДБм, уровень Ec/No > –10 ДБм. Для пригородов и областей пороги можно снизить до RSCP > –100 ДБм, Ec/No > –15 ДБм. В результате, если процесс запуска трейсов и сравнение измеренных соседних секторов с конфигурацией сети автоматизировать, можно получить удобный инструмент для поиска и предупреждения ситуаций, связанных с увеличением внутрисистемной интерференции из-за неописанных хэндоверов между секторами сети WCDMA.

В сетях WCDMA уровень RTWP отражает общую интерференционную картину в обратном канале сектора, включая полезную нагрузку сектора, внутрисистемную и внесистемную интерференцию. В случае увеличения любого из видов интерференции уменьшается емкость сектора, что может привести к отказам в установлении каналов для абонентов и снижению качества обслуживания. Наиболее распространенный случай –

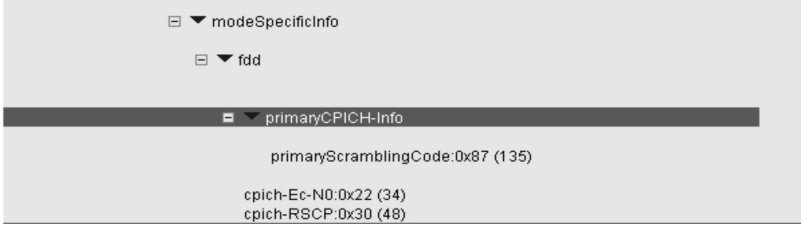


Рис. 2. Пример сообщения RRC measurement control

увеличение внутрисистемной интерференции по причине неописанных хэндоверов между секторами сети. С помощью аналитических расчетов и проведенного тестирования при некорректной конфигурации радиоподсистемы для максимальной удаленности абонента от обслуживающей соты получено увеличение нагрузки от одного абонента с голосовым сервисом CS AMR 12.2 минимум в 5–7 раз. Предложенный метод, основанный на анализе сообщений «RRC measurement control», собираемых с помощью трейсов на радиоподсистеме, является альтернативой проведению драйв-тестов, требующих больших трудозатрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Электронный ресурс] http://support.huawei.com, 31183622-DBS3800-iDBS3800 Product Documentation-(V100R011C00_08), SE0000447644

2. [Электронный ресурс] 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #40bis, On the Accuracy of RTWP and RoT Measurements (R1-050330), Апрель 2005

3. HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications [Текст]/Ed. by H. Holma, A Toskala. –2006. –John Wiley & Sons, Ltd. С. 95–98.

4. **Иванов, М.В.** Расчет пропускной способности радиоканала HSUPA с учетом особенностей высокоскоростной передачи данных [Текст]/М.В. Иванов// Вестник связи.–2009.–№8.

УДК 53.087/.088

С.А. Останин, А.М. Шайдук, Г.А. Семёнов

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ МАЛОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Задачи обнаружения сигналов малой длительности, скрытых в шуме, решаются при приеме и обработке сигналов различной природы в разных технических устройствах: радиолокаторах, лидарах, лазерных доплеровских анемометрах, устройствах связи. Эффективные методы обнаружения периодических сигналов в смеси с шумом основаны на спектральном анализе [1, 2]. При применении спектральных методов для обнаружения периодических сигналов малой длительности в смеси с шумом существует необходимость оценки величины таких специфических параметров этих сигналов, которые определяют границы применимости спектральных методов. К таким параметрам относится, например, скважность передачи. При некотором значении этого параметра спектральные плотности мощности периодического и непериодического фрагмента на частоте периодического фрагмента становятся сопоставимы, и вероятность обнаружения становится неприемлемой. Цель настоящей статьи – анализ эффективности спектрального метода обнаружения периодических сигналов малой длительности

Оценим критическое значение скважности передачи, при которой возможно обнаружение периодического сигнала малой длительности. Рассмотрим отрезок гармонического колебания:

$$x(t)=\begin{cases} x_P(t)=x_0\sin(\omega_0 t),\ 0\le t\le \alpha T \\ x_{Ш}(t),\ \alpha T<t\le T, \end{cases} \qquad (1)$$

где $\alpha << 1$ – относительная длительность периодического фрагмента, $x_{Ш}(t)$ – случайный сигнал (шум), имеющий несмещенную статистическую плотность распределения $p(x)$ (нормированную на единицу) со средним квадратическим отклонением $\sigma_{Ш}$.

Вероятность получить в некоторый произвольный момент времени значение сигнала x в интервале dx при этом равна

$$dW(x)=p(x)dx, \qquad (2)$$

доля значений x, не превосходящих некоторое $x_0 \in (0;\infty)$

$$W(x\le x_0)=\int_0^{x_0} p(x)dx. \qquad (3)$$

Естественным обобщением выражения (2) на дискретный сигнал x_n является соотношение:

$$\frac{\Delta N(x)}{N} = p(x)\Delta x. \quad (4)$$

Оценим значение α, при котором еще возможно обнаружить регулярную компоненту в сигнале типа (1), анализируя спектр мощности исходного сигнала. При этом будем считать, что для анализа доступен только дискретный набор значений одной реализации сигнала, т. е. временной ряд x_n. Фурье-образ сигнала (1) можно представить в виде:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt = A_P(\omega) + A_{Ш}(\omega), \quad (5)$$

где $A_Р(\omega)$ и $A_{Ш}(\omega)$ – Фурье-образы регулярной и случайной составляющих соответственно.

В дискретном случае (для временного ряда x_n):

$$A(\omega_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=1}^{N} x_n e^{-i\omega_k t_n}, \ \omega_k = \frac{2\pi k}{T}. \quad (6)$$

Односторонняя спектральная плотность мощности сигнала:

$$S(\omega) = \begin{cases} 2\left|A(\omega)\right|^2, & \omega \geq 0 \\ 0, & \omega < 0 \end{cases}. \quad (7)$$

В дискретном случае объем массива односторонней спектральной плотности мощности $S(\omega_k)$, соответствующей временному ряду x_n объемом N, равен $N/2$. Для сигнала (1) односторонний спектр

$$S(\omega) = 2\left|A(\omega)\right|^2 = 2\left(\left|A_P(\omega)\right|^2 + \left|A_{Ш}(\omega)\right|^2 + A_P^*(\omega)A_{Ш}(\omega) + A_P(\omega)A_{Ш}^*(\omega)\right). \quad (8)$$

Пренебрегая в выражении (8) малыми слагаемыми, можно записать:

$$S(\omega) \approx S_Р(\omega) + S_{Ш}(\omega). \quad (9)$$

Рассмотрим компоненту спектра $S_{Ш}(\omega)$, соответствующую случайной составляющей $x_{Ш}(t)$ в предположении, что ее функция распределения $p(x)$ является нормальной. В [3] показано, что для случайного центрированного нормально распределенного сигнала $x_{Ш}(t)$ действительная и мнимая части его Фурье-образа $A_{Ш}(\omega)$ также являются центрированными и нормально распределенными с дисперсиями $\sigma_A^2 \equiv \sigma_{A_{Ш}^{Re}}^2 = \sigma_{A_{Ш}^{Im}}^2$. С учетом независимости действительной и мнимой частей Фурье-образа сигнала $x_{Ш}$ запишем выражение для вероятности $dW(A_ш)$ попадания комплексного значения $A_ш$ в элемент площади $d(A_ш^{Re})\ d(A_ш^{Im})$ на плоскости комплексных чисел:

$$dW(A_{Ш}) = p(A_{Ш}^{Re})p(A_{Ш}^{Im})d(A_{Ш}^{Re})d(A_{Ш}^{Im}) = \frac{1}{2\pi\sigma_A^2} e^{-\frac{(A_{Ш}^{Re})^2+(A_{Ш}^{Im})^2}{2\sigma_A^2}} d(A_{Ш}^{Re})d(A_{Ш}^{Im}) = \frac{1}{2\pi\sigma_A^2} e^{-\frac{|A_{Ш}|^2}{2\sigma_A^2}} d(A_{Ш}^{Re})d(A_{Ш}^{Im}). \quad (10)$$

Используя (10), запишем выражение для вероятности попадания значения $|A_ш|$ в элементарное кольцо $d(|A_ш|)$ на комплексной плоскости

$$dW(|A_{Ш}|) = 2\pi|A_{Ш}|\, d(|A_{Ш}|)\frac{1}{2\pi\sigma_A^2} e^{-\frac{|A_{Ш}|^2}{2\sigma_A^2}} = \frac{1}{2\sigma_A^2} e^{-\frac{|A_{Ш}|^2}{2\sigma_A^2}} d(|A_{Ш}|^2), \quad (11)$$

откуда можно выделить плотность распределения величины $|A_ш|^2$:

$$p(|A_{Ш}|^2) = \frac{1}{2\sigma_A^2} e^{-\frac{|A_{Ш}|^2}{2\sigma_A^2}}. \quad (12)$$

Таким образом, плотность распределения односторонней спектральной плотности мощности $S_ш(\omega)$ имеет экспоненциальный вид:

$$p(S_{Ш}) = \frac{1}{\sigma(S_{Ш})} e^{-\frac{S_{Ш}}{\sigma(S_{Ш})}} \ (S_{Ш} > 0), \quad (13)$$

где $\sigma(S_ш) = 4\sigma_A^2$ – среднее квадратическое отклонение значений односторонней спектральной плотности случайной составляющей сигнала.

Используя (3) для одностороннего дискретного спектра $S_ш(\omega)$, получим выражение для количества элементов массива $\tilde{N}$, удовлетворяющих условию $S_ш(\omega_i) \leq S_0$ для произвольного S_0:

$$\tilde{N}(S_0) = \frac{N}{2}\int_0^{S_0} p(S')dS' = \frac{N}{2}(1 - e^{-\frac{S_0}{\sigma(S_{Ш})}}). \quad (14)$$

Найдем S_0 такое, что $\tilde{N}(S_0) > \frac{N}{2} - 1$, используя (14):

$$S_0 > \sigma(S_{Ш})\ln(\frac{N}{2}). \quad (15)$$

Выражение (15) будем считать критерием выброса (промаха) для массива значений $S_ш(\omega_k)$, позволяющим выявить элементы, принадлежащие другой статистике (в нашем случае – соответствующей регулярной компоненте сигнала). То есть в случае, если существует $S_0 \in S(\omega_k)$, удовлетворяющее условию (15), возможно обнаружение регулярной составляющей в сигнале типа (1) с помощью анализа спектра мощности исходного сигнала. Данное условие легло в основу алгоритма детектирования периодичности в дискретном сигнале x_n.

В соответствии с теоремой Парсеваля для регулярного сигнала:

$$\int_{-\infty}^{\infty}|x_P(t)|^2\,dt = 2\int_{0}^{\infty}|A_P(\omega)|^2\,d\omega, \qquad (16)$$

$$\left\langle x_P^2\right\rangle \alpha T \approx \left\langle |A_P|^2\right\rangle \Delta\omega \approx \left\langle |A_P|^2\right\rangle \frac{2\pi}{\alpha T}, \qquad (17)$$

где $\left\langle x_P^2\right\rangle$ и $\left\langle |A_P|^2\right\rangle$ – средние квадраты (интенсивности) регулярной составляющей сигнала и ее Фурье-образа соответственно. В оценке (17) использовалось соотношение неопределенностей $\Delta\omega\alpha T \approx 2\pi$. Аналогично для $x_{\text{Ш}}(t)$ в случае дискретного преобразования Фурье, получаем:

$$\left\langle x_{\text{Ш}}^2\right\rangle (1-\alpha)T \approx \left\langle |A_{\text{Ш}}|^2\right\rangle \Delta\Omega_{\text{Ш}} \approx \left\langle |A_{\text{Ш}}|^2\right\rangle \frac{2\pi N}{T}, \qquad (18)$$

где $\Delta\Omega_{\text{Ш}} = \dfrac{2\pi N}{T}$ – величина частотной полосы шума (в дискретном случае).

Из (17), (18) получаем уравнение, позволяющее оценить величину α:

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha}\frac{\left\langle x_P^2\right\rangle}{\left\langle x_{\text{Ш}}^2\right\rangle} = \frac{\left\langle |A_P|^2\right\rangle}{\left\langle |A_{\text{Ш}}|^2\right\rangle}\frac{1}{N}. \qquad (19)$$

Разрешая (19) относительно α с учетом $\alpha << 1$, получаем:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\left\langle x_{\text{Ш}}^2\right\rangle}{\left\langle x_P^2\right\rangle}\frac{\left\langle |A_P|^2\right\rangle}{\left\langle |A_{\text{Ш}}|^2\right\rangle}\frac{1}{N}} = \frac{\beta}{\eta\sqrt{N}}, \qquad (20)$$

где $\eta = \sqrt{\dfrac{\left\langle x_P^2\right\rangle}{\left\langle x_{\text{Ш}}^2\right\rangle}}$ – относительная интенсивность периодического фрагмента; $\beta^2 = \dfrac{\left\langle |A_P|^2\right\rangle}{\left\langle |A_{\text{Ш}}|^2\right\rangle}$ – относительная оценка спектральной плотности мощности регулярной компоненты.

Так как в алгоритме поиска периодичности используется не усредненное значение $\left\langle S_P\right\rangle$, а максимальное значение S_P^{max} массива спектральной плотности, на которое накладывается условие (15), перепишем выражение для β в виде:

$$\tilde{\beta}^2 = \frac{S_P^{\max}}{\left\langle S_{\text{Ш}}\right\rangle} = \frac{\sigma(S_{\text{Ш}})\ln(\frac{N}{2})}{\sigma(S_{\text{Ш}})} = \ln(\frac{N}{2}), \qquad (21)$$

где S_P^{max} – максимальное значение $S_{\text{ш}}(\omega_k)$. С учетом (21) получим:

$$\tilde{\alpha} = \frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\ln(\frac{N}{2})}{N}}. \qquad (22)$$

Границы применимости стандартного спектрального метода анализа также были установлены посредством численного моделирования. На рис. 1 приведена зависимость вероятности обнаружения периодического фрагмента от его относительной длительности при разных относительных интенсивностях периодического фрагмента. Объем выборок, используемых для оценок, составлял 10^4 элементов. Видно, что успешное детектирование (с вероятностью ≥ 0,9) периодического фрагмента с единичной относительной интенсивностью ($\eta^2 = 1$) возможно при α ≥ 3 %, для фрагмента с половинной относительной интенсивностью ($\eta^2 = 0{,}49$) – при α ≥ 5 % (линии, соединяющие экспериментальные точки на рис. 1, 3, 4, проведены для наглядности, смысловой нагрузки не несут).

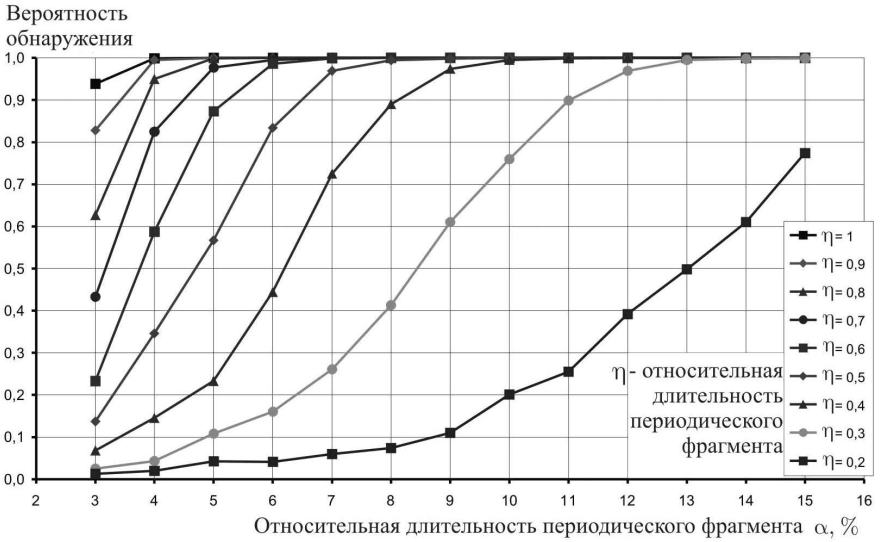


Рис. 1. Зависимость вероятности обнаружения периодического фрагмента от его относительной длительности (стандартный метод)

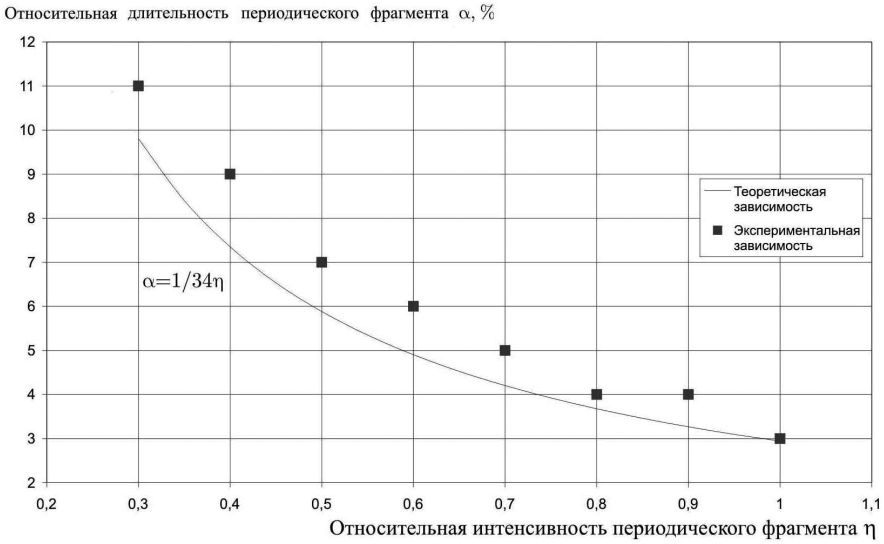


Рис. 2. Зависимость относительной длительности периодического фрагмента от его относительной интенсивности (при успешном поиске периодического фрагмента) для выборок объемом 10^4 элементов

На рис. 2 представлены зависимости относительной длительности периодического фрагмента сигнала, необходимой для его успешного детектирования (с вероятностью $\geq 0{,}9$), от относительной длительности периодического фрагмента, полученные экспериментально и теоретически в диапазоне $0{,}3 \leq \eta^2 \leq 1{,}0$ для выборок объемом 10^4 элементов. Теоретические значения параметров периодического фрагмента, при которых еще возможно его успешное детектирование в шуме, несколько ниже значений, полученных экспериментально (все отличия лежат в пределах 20 %), что естественно, поскольку данные значения являются граничными.

На рис. 3 приведены результаты аналогичного численного эксперимента по выявлению границ применимости стандартного спектрального метода анализа для выборок объемом 10^5 элементов. В данном случае успешное детектирование (с вероятностью $\geq 0{,}9$) периодического фрагмента с единичной относительной интенсивностью ($\eta^2 = 1$) возможно при относительной длительности периодического фрагмента $\alpha \geq 1$ %, для фрагмента с половинной относительной интенсивностью ($\eta^2 = 0{,}49$) – при $\alpha \geq 1{,}5$ %.

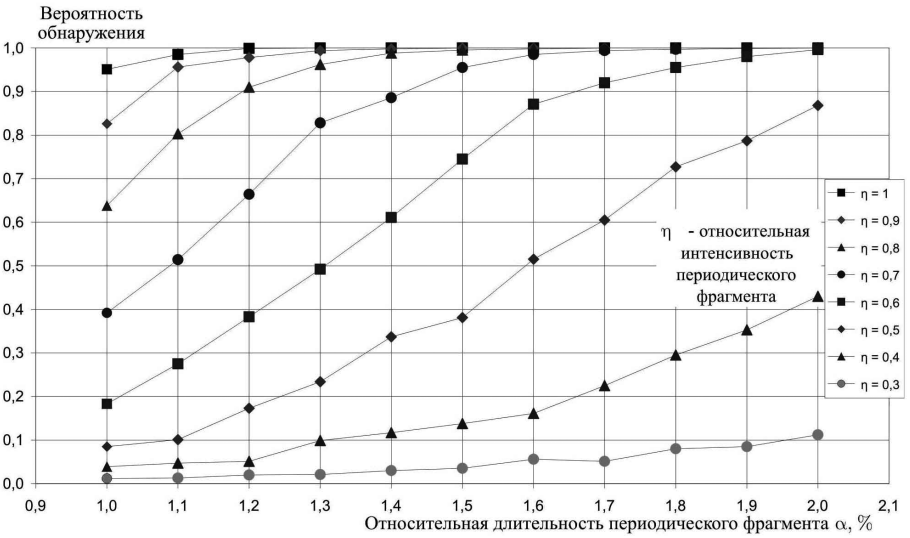


Рис. 3. Зависимость вероятности обнаружения периодического фрагмента от его относительной длительности (стандартный метод)

Анализ условия обнаружения периодического фрагмента (22) показывает, что допустимая относительная длительность периодического фрагмента тем меньше, чем больше отношение средних значений спектральных плотностей мощности регулярной и случайной компонент. Это говорит о принципиальной возможности повышения эффективности обнаружения периодического фрагмента при изменении соотношения длительностей периодического и непериодического фрагментов. Для реализации этой возможности использовался оконный спектрально-статистический метод анализа – метод разделения сигнала с помощью временного окна и исследования статистических свойств каждого фрагмента в отдельности [4].

Для нормально распределенного шума получены оценки граничных значений дисперсии спектра, позволяющие установить критерий выброса, аналогичный условию (15) для выборок объемом 10^4 и 10^5 элементов: интегрирование плотности распределения дисперсии спектра (аналогичное (14)) проводилось численно. Плотность распределения дисперсии спектра мощности по центральной предельной теореме при больших значениях объема выборки стремится к нормальной, однако в ходе численного эксперимента установлено, что последнее утверждение справедливо для выборок объемом более 10^3 элементов (что превышает величину используемого временного окна). Для выборок меньших объемов условия теоремы не выполняются, и вид распределения существенно зависит от количества элементов в выборке, что и вызвало необходимость проведения численного эксперимента по получению оценок граничных значений дисперсии спектра. Границы применимости оконного спектрально-статистического метода анализа были установлены в программной среде LabVIEW.

На рис. 4 представлена зависимость, аналогичная приведенной на рис. 1, для оконного метода. Объем используемых для оценок выборок составлял 10^4 элементов, величина временного окна – 1 % от объема выборки. Из рисунка видно, что успешное детектирование периодического фрагмента с единичной относительной интенсивностью возможно при $\alpha \geq 0{,}5$ %.

Для выборок объемом 10^4 элементов в диапазоне относительной интенсивности периодического фрагмента $0{,}5 \leq \eta^2 \leq 1{,}0$ чувствительность стандартного спектрального метода поиска периодического фрагмента в шуме удалось повысить почти на порядок.

Аналогичные результаты получены для выборок объемом 10^5 элементов. Установлено, что успешный поиск (с вероятностью $\geq 0{,}9$) периодического участка оконным спектрально-статистическим методом возможно при $\alpha \geq 0{,}06$ % (оценки выполнены для $\eta^2 = 1$). Чувствительность спектрального метода удалось повысить более, чем на два порядка.

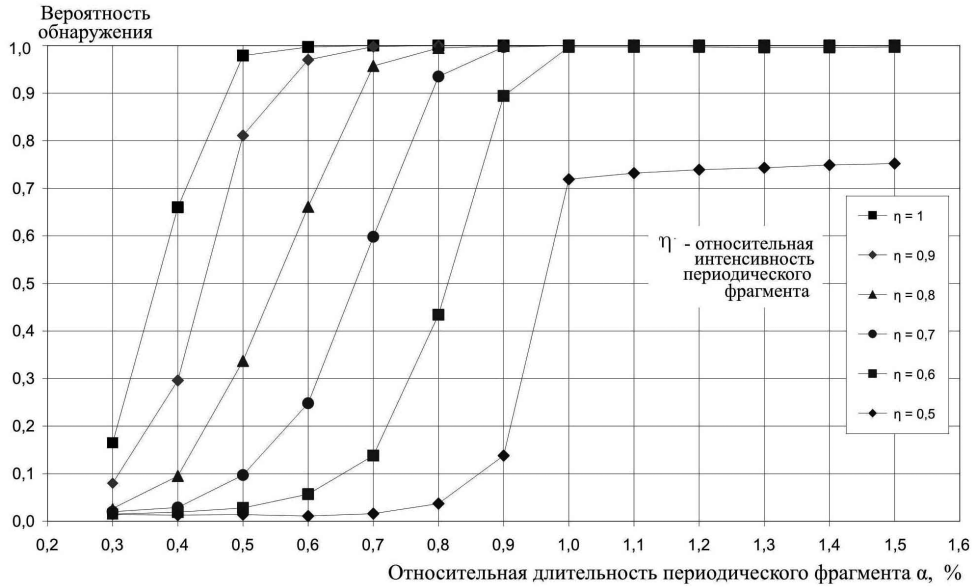


Рис. 4. Зависимость вероятности обнаружения периодического фрагмента от его относительной длительности (оконный метод)

Таким образом, теоретически получено аналитическое выражение для критерия обнаружения периодических сигналов малой длительности спектральным методом. Результаты численного моделирования обнаружения периодических сигналов малой длительности спектральным методом и оконным спектрально-статистическим методом удовлетворительно согласуются с теоретическими оценками. В ходе численного моделирования спектрального и оконного спектрально-статистического методов показано, что последний имеет более высокую эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дженкинс, Г.** Спектральный анализ и его приложения [Текст]/Г. Дженкинс, Д. Ваттс.–М.: Мир.–1971. –Вып.1.–316 с.

2. **Макс, Ж.** Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях [Текст]/Ж. Макс.–М.: Мир.–1983.–Т.1.–312 с.

3. **Фано, Р.** Передача информации. Статистическая теория связи [Текст]/Р. Фано.–М.: Мир.–1965.–438 с.

4. **Останин, С.А.** Корреляционный метод поиска скрытых периодичностей в кинетике генерации лазера [Текст]/С.А. Останин, Г.А. Семёнов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 3 (83).–С. 88–94.

УДК 621.391

О.В. Чернояров, А.Е. Розанов

КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА И ДИСПЕРСИИ СЛУЧАЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА С ПРОИЗВОЛЬНОЙ МОДУЛИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИЕЙ

Под случайным импульсным сигналом с произвольной модулирующей функцией будем понимать мультипликативную комбинацию вида [1–3 и др.]:

$$s(t)=\xi(t)\,f\left(\frac{t-\lambda_0}{\tau}\right)I\left(\frac{t-\lambda_0}{\tau}\right),\ I(x)=\begin{cases}1, & |x|\le 1/2,\\ 0, & |x|>1/2.\end{cases} \quad (1)$$

Здесь λ_0 – время прихода; τ – длительность; $f(t)$ – модулирующая функция; $\xi(t)$ – реализация стационарного центрированного гауссовского случайного процесса, обладающего спектральной плотностью

$$G(\omega)=\frac{\pi D_0}{\Omega}\left\{I\left(\frac{\vartheta-\omega}{\Omega}\right)+I\left(\frac{\vartheta+\omega}{\Omega}\right)\right\},\quad \vartheta>>\Omega, \quad (2)$$

ϑ – центральная частота; Ω – ширина полосы частот; D_0 – дисперсия процесса $\xi(t)$.

Полагается, что флуктуации $\xi(t)$ являются «быстрыми», т. е. длительность импульса τ и характерное время изменения Δt функции $f(t)$ существенно превышают время корреляции процесса $\xi(t)$, так что

$$\tau >> 2\pi/\Omega,\ \Delta t >> 2\pi/\Omega. \quad (3)$$

В [3] рассмотрена задача оценки времени прихода λ_0 сигнала (1), наблюдаемого на фоне гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0, при условии, что все остальные параметры импульса априори известны. Однако в ряде практических задач дисперсия D_0 процесса $\xi(t)$ может быть неизвестна. В этой связи представляет интерес найти структуру и характеристики измерителя времени прихода и дисперсии сигнала (1).

При синтезе алгоритма оценки воспользуемся методом максимального правдоподобия [4, 5]. Согласно этому методу необходимо формировать решающую статистику – логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП) $L(\lambda, D)$ – как функцию текущих значений λ и D неизвестных параметров λ_0 и D_0. При выполнении (3) согласно [2] имеем

$$L(\lambda,D)=\frac{D}{N_0}M(\lambda,D)-\mu\int_{-1/2}^{1/2}\ln\left[1+\frac{D}{E_N}f^2(t)\right]dt,$$
$$M(\lambda,D)=\int_{\lambda-\tau/2}^{\lambda+\tau/2}\frac{f^2\left[(t-\lambda)/\tau\right]y^2(t)}{E_N+Df^2\left[(t-\lambda)/\tau\right]}dt, \quad (4)$$

где $\mu = \tau\Omega/2\pi$, $E_N = N_0\Omega/2\pi$ – средняя мощность шума $n(t)$ в полосе частот процесса $\xi(t)$, а $y(t)=\int_{-\infty}^{\infty}x(t')h(t-t')\,dt'$ – отклик фильтра, пере-

даточная функция $H(\omega)$ которого удовлетворяет условию $|H(\omega)|^2 = I\left[(\vartheta - \omega)/\Omega\right] + I\left[(\vartheta + \omega)/\Omega\right]$, на реализацию наблюдаемых данных $x(t) = s(t) + n(t)$.

Тогда оценки максимального правдоподобия (ОМП) λ_m и D_m времени прихода λ_0 и дисперсии D_0 случайного импульса (1) определятся как положение наибольшего максимума решающей статистики $L(\lambda_0, D)$:

$$\lambda_m = \arg\sup_{\lambda\in[\Lambda_1,\Lambda_2]} L(\lambda, D_m),\ D_m = \arg\sup_{D\geq 0} L(\lambda_m, D). \quad (5)$$

Нетрудно заметить, что измеритель (5) имеет многоканальную структуру, причем для точной его реализации необходимо бесконечно большое число каналов, что вряд ли возможно на практике. В этой связи представляется целесообразным поиск одноканальных квазиоптимальных алгоритмов оценивания временного и энергетического параметров сигнала (1), близких по своим точностным характеристикам к оптимальному (5).

Аналогично [4, 5] можно показать, что ОМП $\lambda_m \to \lambda_0$ в среднеквадратическом, когда $\mu \to \infty$. Тогда, согласно [6], характеристики ОМП D_m (5) асимптотически (с ростом μ) совпадают с характеристиками оценки

$$D_{m0} = \arg\sup_{D\geq 0} L(\lambda_0, D). \quad (6)$$

Измеритель (6) также в общем случае допускает лишь многоканальную реализацию. При этом минимальное рассеяние $V_{\min}$ оценки (6), определяемое формулой Крамера–Рао [4], имеет вид:

$$V_{\min} = -\left\{\left\langle \frac{d^2}{dD^2} L(\lambda_0, D)\right\rangle\Big|_{D=D_0}\right\}^{-1} = E_N^2\left\{\mu\int_{-1/2}^{1/2}\frac{f^4(t)\,dt}{\left[1+q_0 f^2(t)\right]^2}\right\}^{-1}, \quad (7)$$

где $q_0 = D_0/E_N$. Как отмечено в [4], рассеяние ОМП (6) асимптотически (с ростом выходного ОСШ) совпадает с (7).

Рассмотрим вместо ОМП D_{m0} (6) квазиоптимальную оценку (КОО) дисперсии D_{q0}. Синтез КОО D_{q0} будем проводить, исходя из критерия близости ее рассеяния к минимальному (7) при условии возможности ее технической реализации в виде одноканальных устройств. Кроме того, в некоторых предельных случаях КОО D_{q0} должна переходить в ОМП D_{m0}. В результате приходим к оценке вида

$$D_{q0} = \max\left[0; \left(M(\lambda_0)/\tau - E_N\right)/F_2\right], \quad (8)$$

$$M(\lambda) = \int_{\lambda-\tau_0/2}^{\lambda+\tau_0/2} y^2(t)\,dt,\quad F_n = \int_{-1/2}^{1/2} f^n(t)\,dt, \quad (9)$$

обладающей следующими асимптотическими характеристиками

$$b(D_{q0}|D_0) = 0,\ V(D_{q0}|D_0) = E_N^2\int_{-1/2}^{1/2}\left[1+q_0 f^2(t)\right]^2 dt \Big/ \mu\left[\int_{-1/2}^{1/2} f^2(t)\,dt\right]^2. \quad (10)$$

Здесь $y(t)$ определяется так же, как в (4).

Согласно (7), (10) рассеяние оценки D_{q0} (8) для широкого класса модулирующих функций $f(t)$ при выполнении (3) отличается от предельно достижимого не более чем на 5 %. Если же $f(t)\equiv 1$, то рассеяния (7) и (10) совпадают, т. е. по мере приближения формы модулирующей функции $f(t)$ к прямоугольной КОО (8) сходится к ОМП (6). Это позволяет рекомендовать для измерения дисперсии импульсного сигнала (1) в практических приложениях одноканальный алгоритм (8) вместо более сложного многоканального (6) без существенной потери в точности получаемой оценки.

При неизвестном параметре λ_0 из (8) получаем оценку дисперсии:

$$D_q = \max\left[0; \left(M(\lambda_q)/\tau - E_N\right)/F_2, \right. \quad (11)$$

где $\lambda_q = \arg\sup_{\lambda\in[\Lambda_1,\Lambda_2]} L(\lambda, D_q)$ – оценка времени прихода импульса (1). Подставляя (11) в (4) и выполняя оптимизацию алгоритма оценивания, следуя [7], вместо оценки λ_m (5) приходим к оценке времени прихода вида

$$\lambda_q = \arg\sup_{\lambda\in[\Lambda_1,\Lambda_2]} M(\lambda). \quad (12)$$

Оценки (11), (12) также будем называть КОО. Действительно, если $f(t)\equiv 1$, то КОО (11), (12) переходят в соответствующие ОМП дисперсии и времени прихода высокочастотного случайного импульса прямоугольной формы [8].

Измеритель (11), (12) временного и энергетического параметров импульсного сигнала (1) может быть реализован в виде, показанном на рис. 1. Здесь обозначено: 1 – ключ, открывающийся на время $[\Lambda_1 - \tau/2, \Lambda_2 + \tau/2]$; 2 – фильтр с передаточной функцией $H(\omega)/\sqrt{\tau F_2}$ (4); 3 – квадратор; 4 – интегратор; 5 – линия задержки на время τ; 6 – вычитающее устройство; 7 – экстрематор, фиксирующий в качестве оценки λ_q положение наибольшего максимума входного сигнала; 8 –

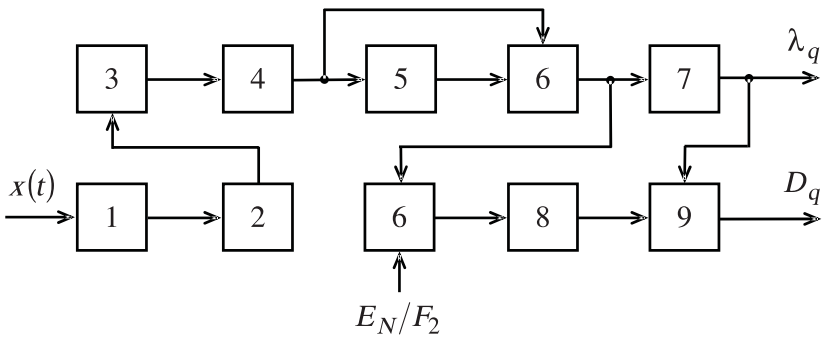


Рис. 1. Квазиоптимальный измеритель времени прихода
и дисперсии случайного импульса с произвольной модулирующей функцией

нелинейный элемент с характеристикой max(0, *x*); 9 – стробирующее устройство, формирующее отсчет сигнала в момент времени $t = \lambda_m + \tau/2$.

Найдем характеристики оценок (11), (12). Для этого представим функционал $M(\lambda)$ (9) в виде суммы сигнальной $S(l)$ и шумовой $N(l)$ функций [4, 5]:

$$M(\lambda) = M(l) = S(l) + N(l), \qquad (13)$$

где $S(l) = \langle M(l) \rangle$, $N(l) = M(l) - \langle M(l) \rangle$, а усреднение выполняется по реализациям наблюдаемых данных $x(t)$ при фиксированных значениях параметров λ_0 и D_0. При выполнении (3) для сигнальной функции $S(l)$ имеем:

$$S(l) = A \int_{-1/2+\max(0,l-l_0)}^{1/2+\min(0,l-l_0)} f^2(t)\,dt + S_N, \quad S_N = \tau_0 E_N, \qquad (14)$$

где $A = \tau D_0$, а E_N определяется из (4).

В соответствии с (13)

$$\langle N(l) \rangle = 0,$$

$$\langle N(l_1)N(l_2) \rangle = \frac{\tau^2 E_N^2}{\mu} \left\{ \int_{-1/2+\max(0,l_1-l_0,l_2-l_0)}^{1/2+\min(0,l_1-l_0,l_2-l_0)} \left[\left(1 + q_0 f^2(t)\right)^2 - 1 \right] dt + \max\left(0, 1 - |l_1 - l_2|\right) \right\}. \qquad (15)$$

В процессе анализа все возможные оценки времени прихода импульса (1) разобьем на два класса: надежные и аномальные [4, 5]. Оценка $l_q = \lambda_q / \tau$ является надежной, если она находится в пределах интервала $\Gamma_S \equiv [l_0 - 1,\ l_0 + 1]$, где сигнальная функция (14) отлична от S_N. Если КОО l_q находится вне интервала Γ_S, т. е. $l_q \in \Gamma_N = \Gamma \setminus \Gamma_S$, $\Gamma \equiv \left[\tilde{\Lambda}_1, \tilde{\Lambda}_2\right]$, $\tilde{\Lambda}_{1,2} = \Lambda_{1,2}/\tau$, то оценка и соответствующая ошибка оценивания называются аномальными [4, 5]. Учет аномальных ошибок необходим, если длина $m = \tilde{\Lambda}_2 - \tilde{\Lambda}_1$ интервала Γ возможных значений времени прихода l_0 значительно больше протяженности интервала Γ_S надежной оценки, т. е.

$$m >> 1. \qquad (16)$$

Согласно [4, 5] при выполнении (16) условные смещение $b(l_q|l_0) = \langle l_q - l_0 \rangle$ и рассеяние $V(l_q|l_0) = \langle (l_q - l_0)^2 \rangle$ оценки l_q с учетом аномальных ошибок могут быть записаны в виде:

$$b(l_q|l_0) = P_0 b_0(l_q|l_0) + (1 - P_0)\left[\left(\tilde{\Lambda}_1 + \tilde{\Lambda}_2\right)/2 - l_0 \right],$$

$$V(l_q|l_0) = P_0 V_0(l_q|l_0) + \qquad (17)$$

$$+ (1 - P_0)\left[\left(\tilde{\Lambda}_1^2 + \tilde{\Lambda}_1\tilde{\Lambda}_2 + \tilde{\Lambda}_2^2\right)/3 - l_0\left(\tilde{\Lambda}_1 + \tilde{\Lambda}_2\right) + l_0^2 \right].$$

Здесь $b_0(l_q|l_0)$, $V(l_q|l_0)$, $P_0 = P\left[|l_q - l_0| \le 1\right]$ – соответственно условное смещение, условное рассеяние и вероятность надежной оценки l_q (12).

При нахождении $b_0(l_q|l_0)$, $V(l_q|l_0)$ и P_0 будем полагать, что выходное отношение сигнал/шум (ОСШ) z^2 алгоритма (11), (12) достаточно велико, т. е.

$$z^2 = \frac{\left[S(l_0) - S_N\right]^2}{\left\langle N^2(l_0) \right\rangle} = \qquad (18)$$

$$= \mu q_0^2 \left[\int_{-1/2}^{1/2} f^2(t)\,dt \right]^2 \Bigg/ \int_{-1/2}^{1/2} \left[1 + q_0 f^2(t)\right]^2 dt >> 1.$$

Неравенство (18) выполняется при выполнении (3) и не слишком малых q_0. Также будем считать, что $f(t)$ является четной функцией своего аргумента и не обращается в нуль в точках $t = \pm 1/2$.

Можно показать, что с увеличением ОСШ z^2 оценка l_q (12) сходится к истинному значению оцениваемого параметра l_0 в среднеквадратическом смысле [4, 5]. В результате для определения характеристик надежной оценки l_q при $z^2 >> 1$ достаточно исследовать поведение функционала

$M(l)$ (9) в малой окрестности точки $l = l_0$. Обозначим $\Delta = \max\left\{|l_1 - l_0|, |l_2 - l_0|, |l_1 - l_2|\right\}$. Тогда с учетом (3) для (14), (15) при $\Delta \to 0$ справедливы асимптотические разложения

$$\begin{aligned} S(l) &= AF_2 + S_N - Af^2(1/2)|l - l_0| + o(\Delta), \\ \langle N(l_1)N(l_2)\rangle &= (\tau^2 E_N^2/\mu)\Big\{Q - |l_1 - l_2| - \\ &- \Big[\big(1 + q_0 f^2(t)\big)^2 - 1\Big]\big[\max(0; l_1 - l_0; l_2 - l_0) - \\ &- \min(0; l_1 - l_0; l_2 - l_0)\big]\Big\} + o(\Delta), \end{aligned} \tag{19}$$

где $Q = \int_{-1/2}^{1/2} \left[1 + q_0 f^2(t)\right]^2 dt$.

Введем в рассмотрение разностный функционал

$$\varsigma(l) = [M(l) - M(x)]/\sigma_S, \quad l, x \in \tilde{\Lambda}_\delta.$$

Здесь $\sigma_S = Q\tau^2 E_N^2/\mu$, $\tilde{\Lambda}_\delta = [l_0 - \delta, l_0 + \delta]$, а δ фиксировано и выбрано настолько малым, что при $\Delta < \delta$ выражения (19) можно аппроксимировать главными членами асимптотических разложений с требуемой точностью. Тогда при $z >> 1$ (18) функцию распределения $F_0(x|l_0)$ надежной оценки l_q можно представить в виде:

$$\begin{aligned} F_0(x|l_0) &= P[l_q < x] \\ &= P\Big[\max_{l<x} \varsigma(l) > \max_{l\ge x} \varsigma(l)\Big], \; l, x \in \tilde{\Lambda}_\delta. \end{aligned}$$

Используя теорему Дуба в формулировке [9], можно показать, что процесс $\varsigma(l)$ на интервале $\tilde{\Lambda}_\delta$ является асимптотически (при $\mu \to \infty$) гауссовским марковским случайным процессом диффузионного типа, коэффициенты сноса K_1 и диффузии K_2 которого при $l \ge x$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} K_1 &= kz \begin{cases} 1, & l < l_0, \\ -1, & l \ge l_0, \end{cases} \\ K_2 &= \left[1 + \left(1 + q_0 f^2(1/2)\right)^2\right]/Q, \quad k = f(1/2)/F_1. \end{aligned} \tag{20}$$

Здесь F_1 рассчитывается согласно (9). Тогда на основе результатов работ [3,10] находим

$$\begin{aligned} b_0(l_q|l_0) &\approx 0, \\ V_0(l_q|l_0) &= 13K_2^2/8K_1^4 = \\ &= 13\left\{1 + \left[1 + q_0 f^2(1/2)\right]^2\right\}^2/8\mu^2 q_0^4 f^8(1/2). \end{aligned} \tag{21}$$

Точность формул (21) возрастает с увеличением μ и z. При $f(t) \equiv 1$ из (21) получаем известные выражения для условных смещения и рассеяния ОМП времени прихода случайного импульса (1) с прямоугольной модулирующей функцией без учета аномальных ошибок [10].

Из [3], (21) следует, что характеристики надежной КОО (12) совпадают с соответствующими характеристиками ОМП времени прихода сигнала (1) с априори известными остальными параметрами. Таким образом, в случае достаточно высоких выходных ОСШ алгоритм (12) может считаться эквивалентным (по точности выносимой оценки) оптимальному и быть рекомендован к использованию в практических приложениях для измерения времени прихода импульсного сигнала (1) вместо более технически сложного и требующего большего объема априорной информации МП алгоритмов (5) или [3], в т. ч., когда форма модулирующей функции импульса неизвестна.

Вычислим теперь вероятность P_0 надежной оценки l_q, для чего при выполнении (16) аналогично [3, 10] представим ее как

$$P_0 = \int F_N(\kappa)\, dF_S(\sigma_N \kappa/\sigma_S), \tag{22}$$

где $F_N(\kappa) = P[H_N/\sigma_N < \kappa]$, $F_S(\kappa) = P[H_S/\sigma_S < \kappa]$, $H_N = \sup_{l\in\Gamma_N} \overset{\circ}{M}(l)$, $H_S = \sup_{l\in\Gamma_S} M(l)$ – абсолютные максимумы центрированного функционала $\overset{\circ}{M}(l) = M(l) - S_N$ на интервалах аномальной и надежной оценок соответственно, $\sigma_N^2 = \tau^2 E_N^2/\mu$, а интегрирование ведется по всем возможным значениям к. При выполнении (3), (16) вероятность $F_N(\kappa)$ можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} F_N(\kappa) &= P\left[\overset{\circ}{M}(l)/\sigma_N < \kappa\right] = \\ &= P[N(l)/\sigma_N < \kappa], \; 1 \in \left[\tilde{\Lambda}_1, l_0 - 1\right] \cup \left[l_0 + 1, \tilde{\Lambda}_2\right]. \end{aligned}$$

Здесь $N(l)$ – асимптотически (при $\mu \to \infty$) гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией $\langle N(l_1)N(l_2)\rangle = \sigma_N^2 \max(0, 1 - |l_1 - l_2|)$. В [11] показано, что распределение числа выбросов стационарного центрированного гауссовского случайного процесса за уровень к является асимптотически пуассоновским при $\kappa \to \infty$. Тогда на основе результатов [5, 12] для $F_N(\kappa)$ получаем:

$$F_N(\kappa) = \begin{cases} \exp\left[-\dfrac{m\kappa}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\dfrac{\kappa^2}{2}\right)\right], & \kappa \ge 1; \\ 0, & \kappa < 1. \end{cases} \tag{23}$$

Точность формулы (23) возрастает с увеличением m и к.

Перейдем к определению вероятности $F_S(u)$, для чего перепишем ее как

$$F_S(\kappa) = P[\varsigma_0(l) < \kappa - \kappa_0], \quad l \in \tilde{\Lambda}_\delta. \tag{24}$$

Здесь $\varsigma_0(l) = [M(l) - M(l_0)]/\sigma_S$, $\kappa_0 = [M(l_0) - S_N)]/\sigma_S$. Как следует из (19), реализации случайного про-

цесса $\varsigma_0(l)$ с учетом его асимптотической гауссовости приближенно статистически независимы на интервалах $[l_0 - \delta, l_0)$ и $[l_0, l_0 + \delta]$. Тогда для (24) имеем:

$$F_S(\kappa) = F_1(\kappa - \kappa_0)\, F_2(\kappa - \kappa_0),$$
$$F_1(\kappa) = P\left[\underset{l_0-\delta \le l < l_0}{\varsigma_0(l)} < \kappa\right],\ F_2(\kappa) = P\left[\underset{l_0 \le l < l_0+\delta}{\varsigma_0(l)} < \kappa\right]. \quad (25)$$

Нетрудно показать, что случайная величина κ_0 является асимптотически (при $\mu \to \infty$) гауссовской случайной величиной с математическим ожиданием z (18) и единичной дисперсией. Тогда функцию распределения (25) можно представить в виде

$$F_S(\kappa) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\kappa} F_1(\kappa - y)\, F_2(\kappa - y) \exp\left[-(y-z)^2/2\right] dy, \quad (26)$$

причем, в силу симметрии статистических свойств функционала $M(l)$ (9) относительно точки $l = l_0$ $F_1(\kappa) = F_2(\kappa)$.

Вероятности $F_1(\kappa)$, $F_2(\kappa)$ можно найти, используя марковские свойства процесса $\varsigma_0(l)$. В результате, следуя [5, 10], для функций $F_1(\kappa)$, $F_2(\kappa)$ получаем:

$$F_1(\kappa) = F_2(\kappa) = \Phi\left[\frac{|K_1|\delta + \kappa}{\sqrt{\delta K_2}}\right] - \exp\left(-\frac{2|K_1|\kappa}{K_2}\right)\Phi\left[\frac{|K_1|\delta - \kappa}{\sqrt{\delta K_2}}\right]. \quad (27)$$

Здесь K_1 и K_2 определяются из (20), а $\Phi(x) = \left(1/\sqrt{2\pi}\right)\int_{-\infty}^{x} \exp\left(-t^2/2\right) dt$ – интеграл вероятности. Подставляя (27) в (26), используя при $z \to \infty$ асимптотическое представление интеграла вероятности [5]: $\Phi(x) \xrightarrow[x\to\infty]{} 1 - \exp\left(-x^2/2\right)/\sqrt{2\pi}x$ и пренебрегая членами более высоких порядков малости по z, после выполнения операции интегрирования имеем:

$$F_S(\kappa) = \Phi(\kappa - z) - 2\exp\left[\frac{\psi^2 z^2}{2} + \psi z(z-\kappa)\right]\Phi\left[\kappa - z(\psi+1)\right] + \exp\left[2\psi^2 z^2 + 2\psi z(z-\kappa)\right]\Phi\left[\kappa - z(2\psi+1)\right]. \quad (28)$$

Здесь $\psi = 2k/K_2 = 2Qf(1/2)/F_2\left[1 + (1 + q_0 f(1/2))^2\right]$.

Используя теперь аппроксимации (23), (28) в (22), для вероятности P_0 надежной КОО l_q находим

$$P_0 = \frac{2\psi z}{r}\exp\left(\frac{\psi^2 z^2}{2} + \psi z^2\right)\int_1^{\infty} \exp\left[-\frac{m\kappa}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{\kappa^2}{2}\right)\right] \times \left\{\exp\left(-\frac{\psi z x}{r}\right)\Phi\left[\frac{\kappa}{r} - z(\psi+1)\right] - \exp\left[\frac{3\psi^2 z^2}{2} + \psi z\left(z - \frac{2\kappa}{r}\right)\right]\Phi\left[\frac{\kappa}{r} - z(2\psi+1)\right]\right\} d\kappa, \quad (29)$$

где $r = \sigma_S/\sigma_N = \sqrt{Q}$. Полагая в (29) $f(t) \equiv 1$, получаем известное выражение для вероятности надежной оценки времени прихода прямоугольного случайного импульса [10]. Кроме того, при $z > 1{,}5...2$ вероятность (29) практически совпадает с вероятностью надежной оценки времени прихода сигнала (1) с априори известными остальными параметрами, найденной в [3]. Следовательно, измеритель (12) может быть использован вместо измерителей (5), [3] без заметной потери в точности выносимой оценки в широком диапазоне выходных ОСШ.

Найдем теперь характеристики КОО D_q (11). С этой целью аналогично [10] запишем функцию распределения случайной величины $U = \left[M(\lambda_q) - \mathrm{SN}\right]/\sigma_S$ как

$$F_U(x) = F_S(x)\, F_N(rx), \quad (30)$$

если m >> 1, и

$$F_U(x) = F_S(x), \quad (31)$$

если $m \lesssim 1$. Здесь $F_U(x)$, $F_S(x)$ и r определяются из (23), (28) и (29) соответственно. Функция распределения $F_q(x|D_0) = P[D_q < x]$ оценки D_q связана с функцией $F_U(x)$ соотношением:

$$F_q(x|D_0) = \theta(x)\, F_U\left(\frac{zx}{D_0}\right),\ \theta(x) = \begin{cases} 1, & |x| \ge 0; \\ 0, & |x| < 0. \end{cases} \quad (32)$$

С учетом (32) для условных смещения $b(D_q|D_0) = \langle D_q - D_0 \rangle$ и рассеяния $V(D_q|D_0) = \langle (D_q - D_0) \rangle$ оценки D_q получаем:

$$b(D_q|D_0) = \int_0^{\infty} \left[1 - F_q(x|D_0)\right] dx - D_0,$$
$$V(D_q|D_0) = 2\int_0^{\infty} (x - D_0)\left[1 - F_q(x|D_0)\right] dx + D_0^2. \quad (33)$$

Выполнить интегрирование в (33) аналитически удается только для случая $m \lesssim 1$. Используя аппроксимацию (31) функции $F_U(x)$, для характеристик оценки D_q (11) имеем:

$$b(D_q|D_0) = D_0\left\{\left(1 + \frac{3}{2\psi z^2}\right)\Phi(z) + \frac{2}{\psi z^2}\exp\left[\psi z^2\left(\frac{\psi}{2} + 1\right)\right]\left[1 - \Phi(z(\psi+1))\right] - \frac{1}{2\psi z^2}\exp\left[2\psi z^2(\psi+1)\right]\left[1 - \Phi(z(2\psi+1))\right] + \frac{1}{z\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) - 1\right\}, \quad (34)$$

$$V\left(D_q\middle|D_0\right)=D_0^2\left\{1-\left(1-\frac{1}{z^2}-\frac{7}{2\psi^2z^4}\right)\times\right.$$
$$\times\Phi(z)-\left(1-\frac{1}{\psi z^2}\right)\frac{4}{\psi z^2}\exp\left[\psi z^2\left(\frac{\psi}{2}+1\right)\right]\times$$
$$\times\left[1-\Phi(z(\psi+1))\right]+\left(1-\frac{1}{2\psi z^2}\right)\frac{1}{\psi z^2}\times \quad (34)$$
$$\times\exp\left[2\psi z^2(\psi+1)\right]\left[1-\Phi(z(2\psi+1))\right]-$$
$$\left.-\frac{1}{z\sqrt{2\pi}}\left(1-\frac{3}{\psi z^2}\right)\exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)\right\}.$$

Точность формул (30), (32), (33) возрастает с увеличением μ, z, m, а формул (34) – с увеличением μ и z.

Формулы (30), (32), (33) и (34) существенно упрощаются при весьма больших значениях μ (z), когда вероятностью $P_a = P[l_q \notin \Gamma_S] = 1 - P_0$ аномальной ошибки при оценивании времени прихода l_0 можно пренебречь:

$$b\left(D_q\middle|D_0\right)\approx 3D_0\middle/2\psi z^2\approx 0,\ V\left(D_q\middle|D_0\right)\approx D_0^2\middle/z^2. \quad (35)$$

Таким образом, оценка D_q (11) является асимптотически условно несмещенной, а ее рассеяние согласно (10), (35) асимптотически (с ростом μ и z) совпадает с рассеянием оценки D_{q0} (8).

Полагая в (30)–(34) $f(t) \equiv 1$, получаем выражения для функции распределения и характеристик ОМП дисперсии случайного импульса (1) прямоугольной формы с неизвестным временем прихода [8, 10].

С целью проверки работоспособности предложенного измерителя (11), (12) и установления границ применимости асимптотически точных формул для его характеристик согласно методике, описанной в [10], было выполнено статистическое моделирование алгоритма (11), (12) на ЭВМ. Для сокращения затрат машинного времени использовалось представление отклика $y(t)$ узкополосного фильтра с импульсной переходной функцией $h(t)$ (4) через его низкочастотные квадратуры. С учетом условия узкополосности (2) это позволило формировать решающую статистику $M(\lambda)$ (9) в виде суммы двух независимых случайных процессов:

$$M(\lambda)=[M_1(\lambda)+M_2(\lambda)]/2,$$
$$M_i(\lambda)=\int_{\lambda-\tau/2}^{\lambda+\tau/2}y_i^2(t)\,dt,\quad i=1,2,$$
$$y_i(t)=\int_{-\infty}^{\infty}x_i(t')\,h_0(t-t')\,dt',$$
$$x_i(t)=\xi_i(t)\,f\left[(t-\lambda_0)/\tau\right]I\left[(t-\lambda_0)/\tau\right]+n_i(t).$$

Здесь $\xi_i(t)$ и $n_i(t)$ – статистически независимые центрированные гауссовские случайные процессы со спектральными плотностями $G_0(\omega) = (2\pi D/\Omega)I(\omega/\Omega)$ и N_0 соответственно, а спектр $H_0(\omega)$ функции $h_0(t)$ удовлетворяет условию: $|H_0(\omega)|^2 = I(\omega/\Omega)$. В процессе моделирования с шагом $\Delta(t) = 0{,}1\pi/\Omega$ формировались отсчеты случайных процессов $y_i(t)$, а затем для всех $\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2]$ с шагом $\Delta\lambda = 0{,}01\tau$ – отсчеты случайного процесса $M(\lambda)$, и, согласно (12), вычислялась оценка времени прихода случайного импульса. При этом среднеквадратическая погрешность ступенчатой аппроксимации непрерывных реализаций $M(\lambda)$ на основе сформированных дискретных отсчетов не превышала 10 %. Далее, по найденной оценке времени прихода рассчитывалась нормированная оценка дисперсии (11) случайного импульса (1).

Некоторые результаты статистического моделирования при $l_0 = (\widetilde{\Lambda}_2 + \widetilde{\Lambda}_1)/2$, $\widetilde{\Lambda}_1 = 1/2$, $\widetilde{\Lambda}_2 = m + 1/2$ и $f(\widetilde{t}\,) = \exp(-\widetilde{t}^{\,2})$ показаны на рис. 2, 4, 6, а при $f(\widetilde{t}\,) = 1 - |\widetilde{t}\,|/4$ – на рис. 3, 5, 7. Каждое экспериментальное значение получено при обработке не менее 10^4 реализаций $M(\lambda)$. При этом границы доверительных интервалов отклоняются от экспериментальных данных не более чем на 10...15 % с вероятностью 0,9.

На рис. 2, 3 сплошными линиями нанесены зависимости нормированного условного рассеяния $\widetilde{V}_l(q_0) = 12V\left(l_q\middle|l_0\right)\middle/m^2$ (17) оценки времени прихода l_q (12) с учетом аномальных ошибок при $m = 20$. Здесь же штриховыми линиями показаны аналогичные зависимости нормированного условного рассеяния $\widetilde{V}_{0l}(q_0) = 12V_0\left(l_q\middle|l_0\right)\middle/m^2$ (21) надежной оценки l_q (12). Кривые 1 рассчитаны для $\mu = 50$; 2 – 100; 3 – 200. Экспериментальные значения рассеяния $\widetilde{V}_l$ оценки l_q с учетом аномальных ошибок обозначены на рис. 2, 3 квадратиками, крестиками и ромбиками, а рассеяния $\widetilde{V}_{0l}$ надежной оценки l_q – кружочками, треугольниками и звездочками для $\mu = 50$, 100 и 200 соответственно.

На рис. 4, 5 нанесены теоретические зависимости (34) нормированного условного рассеяния $\widetilde{V}_q = V\left(D_q\middle|D_0\right)\middle/E_N^2$ оценки дисперсии D_q (11), если $m = 1$ (оценка λ_q является надежной), а на рис. 6, 7 – аналогичные зависимости (30), (32), (33), если $m = 20$ (когда при оценивании времени прихода λ_0 возможны аномальные ошибки). Кривые 1 со-

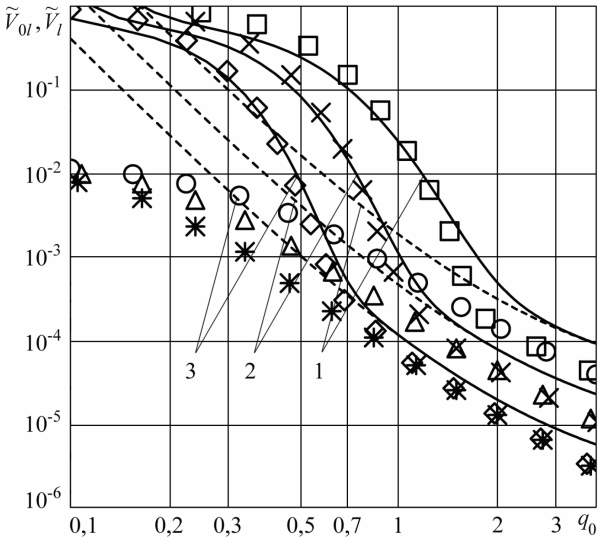


Рис. 2. Рассеяние оценки времени прихода колоколообразного случайного импульса

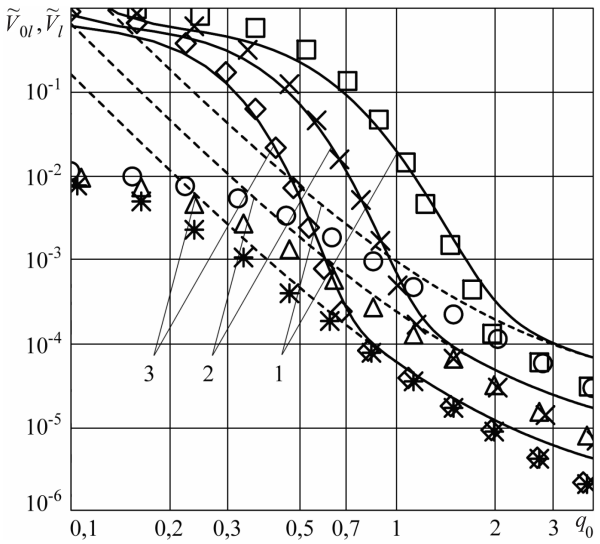


Рис. 3. Рассеяние оценки времени прихода треугольного случайного импульса

ответствуют μ = 50; 2 – 100; 3 – 200. Экспериментальные значения рассеяния $\widetilde{V}_q$ для μ = 50, 100 и 200 обозначены на рис. 4–7 квадратиками, крестиками и ромбиками.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Согласно рис. 2, 3 теоретические зависимости (17) для характеристик оценки времени прихода (12) импульсного сигнала (1) с учетом аномальных ошибок удовлетворительно аппроксимируют экспериментальные данные, по крайней мере, при $m \geq 20$, $\mu \geq 50$, $z \geq 1{,}5...2$ и $\left(f_{\max} - f_{\min}\right)/\mu < 4 \cdot 10^{-3}$.

Здесь $f_{\min}$ и $f_{\max} = 1$ – минимальное и максимальное значения функции $f(t)$.

В случае не слишком больших ОСШ, когда $z \leq 4{,}5...5{,}5$, при оценивании времени прихода необходим учет пороговых эффектов, связанных с появлением аномальных ошибок. Это приводит (по сравнению со случаем надежной оценки) к скачкообразному увеличению рассеяния КОО. С ростом q_0, когда $z > 4{,}5...5{,}5$, рассеяние $\widetilde{V}_l$ сходится к рассеянию $\widetilde{V}_{0l}$, и оценка становится надежной с вероятностью, близкой к 1. При этом, как следует из (17), (29) и рис. 2, 3, минимальное (пороговое)

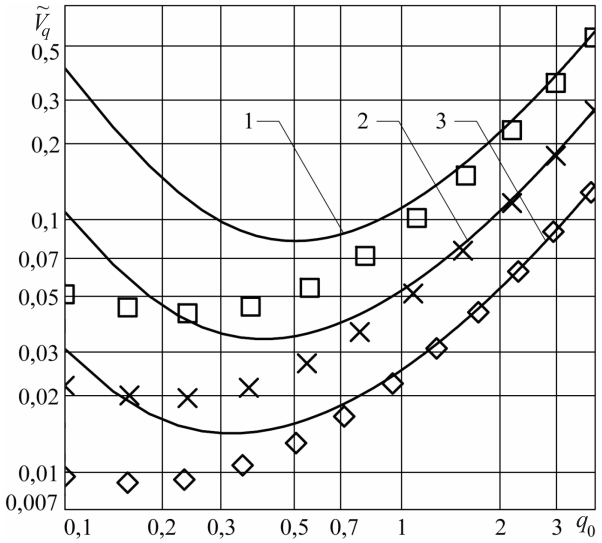


Рис. 4. Рассеяние оценки дисперсии колоколообразного случайного импульса при надежной оценке времени прихода

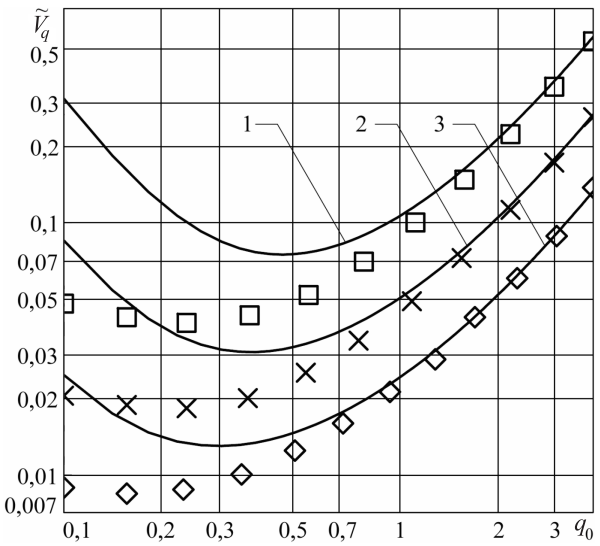


Рис. 5. Рассеяние оценки дисперсии треугольного случайного импульса при надежной оценке времени прихода

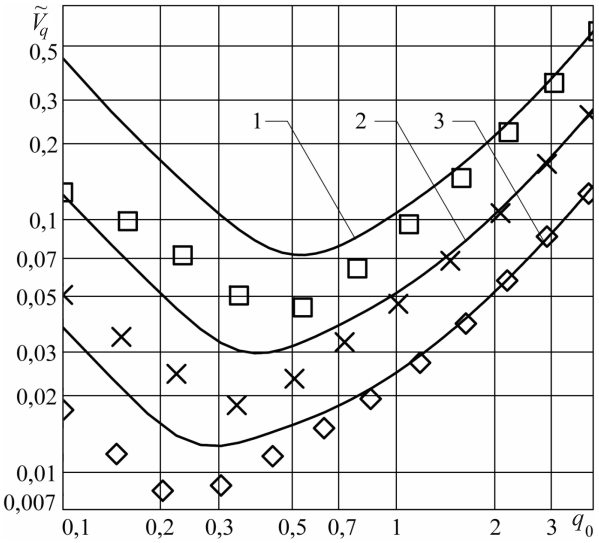


Рис. 6. Рассеяние оценки дисперсии колоколообразного случайного импульса с учетом аномальных ошибок при измерении времени прихода

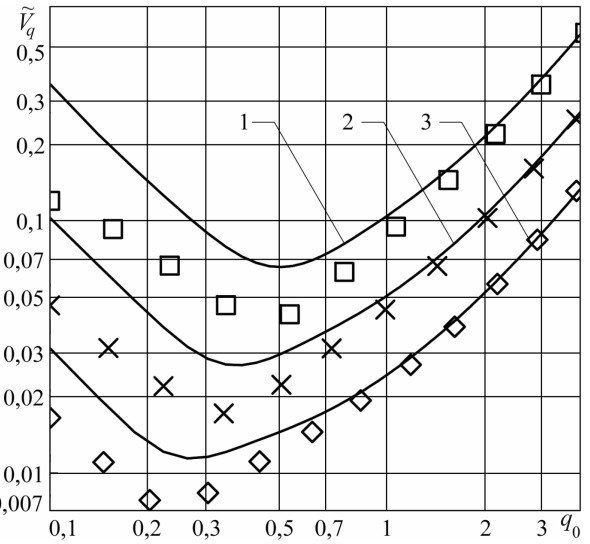


Рис. 7. Рассеяние оценки дисперсии треугольного случайного импульса с учетом аномальных ошибок при измерении времени прихода

значение параметра q_0, при котором влиянием аномальных ошибок на точность оценки времени прихода еще можно пренебречь, уменьшается с увеличением μ и возрастает с увеличением m.

При $z < 2...3$ теоретические зависимости (21) для рассеяния $\widetilde{V}_{0l}$ надежной оценки (12) заметно отклоняются от экспериментальных, поскольку найдены без учета конечной длительности интервала Γ_S. Отклонение теоретических зависимостей $V_0\left(l_q|l_0\right)$ (21), $V\left(l_q|l_0\right)$ (17) от экспериментальных значений наблюдается также и при больших ОСШ, когда $q_0 > 2...3$. Это связано с тем, что формула (21) для рассеяния надежной оценки времени прихода получена в пренебрежении ошибками оценивания порядка времени корреляции случайного процесса $\xi(t)$. Следовательно, когда нормированное рассеяние убывает до величины порядка μ^{-2}, погрешность формул (17), (21) становится значительной.

Формулы (30), (32)–(34) для характеристик оценки дисперсии D_q (11) с учетом и без учета влияния аномальных ошибок на точность оценки времени прихода λ_q (12) удовлетворительно аппроксимируют экспериментальные данные при $m \geq 20$ или $m \leq 1$ и $\mu \geq 50$, $z \geq 4...5$. Если $z > 5$, так что вероятностью аномальной ошибки при оценивании времени прихода можно пренебречь, значения рассеяния $V\left(D_q|D_0\right)$ оценки D_q (11), найденные с помощью (30), (32)–(34) практически совпадают. При $z > 6$ для расчета характеристик оценки дисперсии (11) без заметной потери в точности вместо (34) можно пользоваться формулами (35).

Полученные результаты позволяют сделать обоснованный выбор между предложенными и другими алгоритмами обработки высокочастотных случайных импульсных сигналов произвольной формы с неизвестным временным и энергетическим параметрами в зависимости от требований, предъявляемых к эффективности алгоритма и степени простоты его технической реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вопросы статистической теории радиолокации [Текст]/П.А. Бакут, И.А. Большаков, Б.М. Герасимов [и др.]; Под ред. Г.П. Тартаковского.–М.: Сов. радио, 1963.–Т. 1.–426 с.

2. **Черноярov, О.В.** Квазиправдоподобный обнаружитель случайного импульсного сигнала произвольной формы с неизвестными временными параметрами на фоне помех [Текст]/О.В. Черноярov, А.В. Сальникова//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009. –№ 2.–С. 63–69.

3. **Черноярov О.В.** Оценка времени прихода узкополосного случайного импульса произвольной формы [Текст]/О.В. Черноярov//Радиотехника.–2009. –№ 12.–С. 12–18.

4. **Куликов, Е.И.** Оценка параметров сигналов на фоне помех [Текст]/Е.И. Куликов, А.П. Трифонов.–М.: Сов. радио, 1978.–296 с.

5. **Трифонов, А.П.** Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех [Текст]/ А.П. Трифонов, Ю.С. Шинаков.–М.: Радио и связь, 1986.–264 с.

6. **Бассвиль, М.** Обнаружение изменений свойств сигналов и динамических систем [Текст]/М. Бассвиль, А. Вилски, А. Банвентист [и др.]; Под ред. М. Бассвиль, А.М. Банвентиста.–М.: Мир, 1989.–278 с.

7. **Захаров, А.В.** Оптимизация алгоритма обнаружения флуктуирующего радиоимпульса с неизвестным временем прихода [Текст]/А.В. Захаров//Вестник Воронежского гос. ун-та. Сер. Физика. Математика.–2005.–№ 1.–С. 46–56.

8. **Трифонов, А.П.** Оценка дисперсии случайного импульса с неизвестным временем прихода [Текст]/А.П. Трифонов, А.В. Захаров, О.В. Чернояров//Радиотехника и электроника.–1996.–Т. 41.–№10. –С. 1207–1210.

9. **Kailath, T.** Some integral equations with nonrational kernals [Текст]/T. Kailath//IEEE Trans.–1966.–Vol. IT-12.–№ 4.–P. 442–447.

10. **Чернояров, О.В.** Статистический анализ случайных импульсных сигналов на фоне белой и коррелированной помех с неизвестными интенсивностями [Текст]/О.В. Чернояров//Инфокоммуникационные системы и технологии: проблемы и перспективы; Под ред. А.В. Бабкина.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.–С. 185–247.

11. **Pickands, J.** Upcrossing probabilities for stationary Gaussian process [Текст]/J. Pickands//Trans. Amer. Math. Soc.–1969.–Vol. 145.–№ 11.–P. 51–73.

12. Теория обнаружения сигналов/П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович [и др.]; Под ред. П.А. Бакута.–М.: Радио и связь, 1984.–440 с

УДК 550.388.1:004.436.2:681.327.8

А.Д. Акчурин, К.М. Юсупов

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИОНОЗОНДА «ЦИКЛОН»

Цель работы – модернизация аппаратных средств ионозонда для реализации методики повышения точности определения действующей высоты отражения методом наибольшего правдоподобия в спектральной области [1, 2]. Исследование вызвано необходимостью повышения информативности обработки результатов вертикального зондирования ионосферы. Предлагаемая методика позволяет повысить точность определения действующей высоты до 300–500 м, что в несколько раз превышает обычную типовую точность (~ 2,5 км). Для реализации данного алгоритма [1, 2] необходимо изменить обработку сигналов, а систему управления дополнить схемой имитации зондирующего импульса, что возможно только после модернизации аппаратуры, разработанной в середине 1980-х гг.

Из-за ограниченности финансовых возможностей модернизация свелась к полной замене системы управления ионозонда, практически не затронув сложные в настройке аналоговые узлы, такие как передатчик и приемник. Модернизировать старую систему не представляется возможным, т. к. она собрана на морально устаревших микросхемах ТТЛ серии. Кроме того, метод повышения точности определения действующей высоты постоянно совершенствуется, из-за чего необходимо разработать систему управления, позволяющую оперативно изменять схему с минимумом монтажного вмешательства. Поэтому новая система управления основана на программируемых логических интегральных микросхемах большой емкости (СБИС ПЛ).

Другой знаковой микросхемой в создании системы управления будет микросхема прямого цифрового синтеза частот (ПЦСЧ), т. к. ионозонд – это импульсный радар с быстрой сменой зондирующей частоты (с типовым временем переключения ~10 мс). Поэтому при выборе возбудителя передатчика предпочтение отдано генератору гармонических сигналов на микросхеме ПЦСЧ.

Выбор интерфейсов подключения СБИС ПЛ и ПЦСЧ к компьютеру в настоящее время достаточно широк (наиболее популярные USB и PCI). Предшествующий опыт работы показал, что в непосредственной близости от передающего устройства наиболее стабильно работают PCI устройства, что во многом связано с отсутствием кабелей соединения между компьютером и периферийными устройствами. Опыт также показал, что некоторые узлы и микросхемы сбиваются или выходят из строя во время работы передатчика. Так, например, «родной» первый гетеродин приемника Р-399 «Катран» (собранный на нескольких кольцах ФАПЧ) сбивается по частоте, а у микросхем ПЦСЧ AD9852/54 выходят из строя выходные каскады. Поэтому в качестве рабочего интерфейса для системы управления выбрана PCI-шина, а в качестве генераторов возбудителя передатчика и первого гетеродина – микросхемы ПЦСЧ - AD9851.

Для экономии времени схема управления реализована не на одной плате, а на двух. Первая плата – промышленный отладочный комплект MAX II Dev Kit (с размещенной СБИС ПЛ – EPM1270F256C5), а вторая – разработанная нами дополнительная плата (содержащая микросхемы ПЦСЧ, схему имитации зондирующего импульса и др.). Из-за недостатка опыта пришлось изготовить несколько вариантов дополнительной платы (с последовательным совершенствованием), пока не добились необходимой работоспособности.

В пользу выбора отладочного комплекта сыграло наличие достаточно емкой ПЛ СБИС, позолоченного краевого ламельного разъема PCI, USB интерфейса и 44 свободных контактов (сгруппированные в разъемы, называемые *Santa Cruz Connectors*) для подключения внеш-

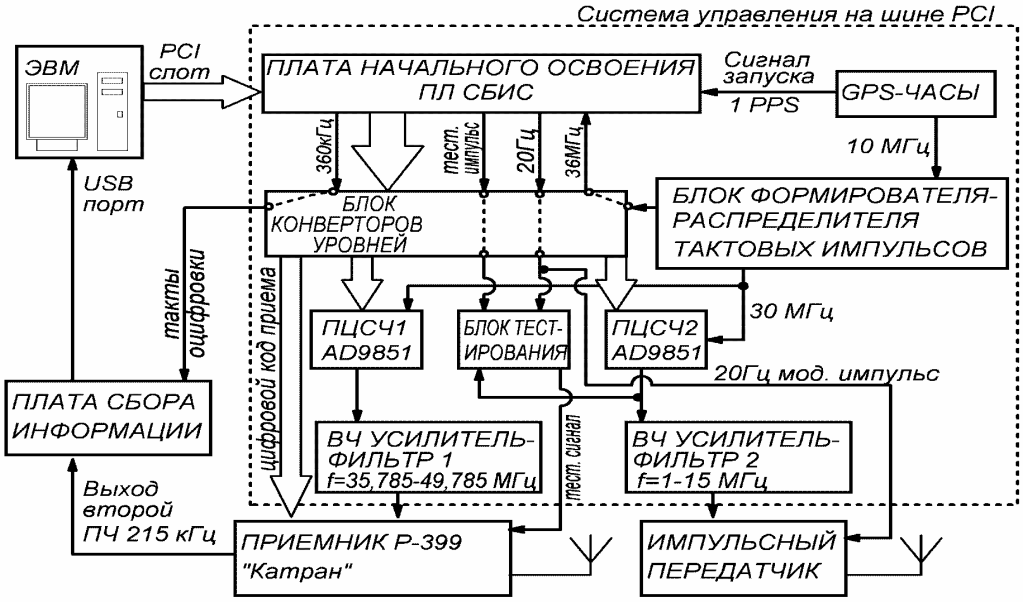


Рис. 1. Структурная схема ионозонда «Циклон»

них устройств. Эти контакты использовались нами для подключения дополнительной платы. Основная задача дополнительной платы – генерация гармонических сигналов для возбуждения передатчика и первого гетеродина приемника, выработка тестового сигнала и согласование интерфейсов ПЛ СБИС с исполнительными устройствами ионозонда. Для того чтобы пояснить режимы работы системы управления, методику повышения точности регистрации высоты отражения и номенклатуру микросхем, размещенных на дополнительной плате, рассмотрим структурную схему ионозонда (рис. 1).

Структурная схема ионозонда

Ионозонд состоит из пяти основных узлов: компьютера, импульсного передатчика, КВ-приемника Р-399 «Катран», платы сбора информации Е-440 (производитель Lcard) и системы управления ионозондом (подключаемой к слоту PCI). Комментарии на структурной схеме (см. рис. 1) поясняют назначения блоков.

Особенности функционирования системы управления следующие. Узлы работают как в классическом импульсном радаре. Запуск сеанса зондирования начинается с появления секундной метки на выходе GPS-часов (1 PPS). Модулирующий импульс для передатчика вырабатывается в схеме, организованной в ПЛ СБИС. Сигнал для возбуждения передатчика вырабатывает генератор ПЦСЧ2. Отраженный от ионосферы сигнал поступает в приемник с двойным преобразованием частоты. Первым гетеродином служит генератор ПЦСЧ1. Вторая ПЧ (215 кГц) с выхода приемника поступает в плату сбора информации (тактовая частота 360 кГц). Для уменьшения входного потока информации программа, производящая зондирование, выполняет цифровое квадратурное детектирование с 6-кратной децимацией сигнала со второй ПЧ. После децимации в компьютер записываются 256 комплексных отсчетов амплитуды и фазы с частотой 60 кГц (с интервалом 16,6 мкс).

Такая процедура зондирования ионосферы повторяется 400 раз, пробегая диапазон частот 1–10 МГц, с частотой повторения 20 Гц. Результат зондирования представляется в виде ионограмм. Для организации такой быстрой перестройки зондирующей частоты необходимы микросхемы ПЦСЧ. Положительной чертой таких микросхем является быстрая перестройка частоты, недостатком – повышенный уровень шумовых гармоник на выходе (по сравнению с ФАПЧ-генераторами), который на нашей плате ослабляется ВЧ усилителями-фильтрами 1 и 2.

Логическая схема системы управления в СБИС ПЛ

Для обеспечения описанного ранее режима работы ионозонда была разработана схема в

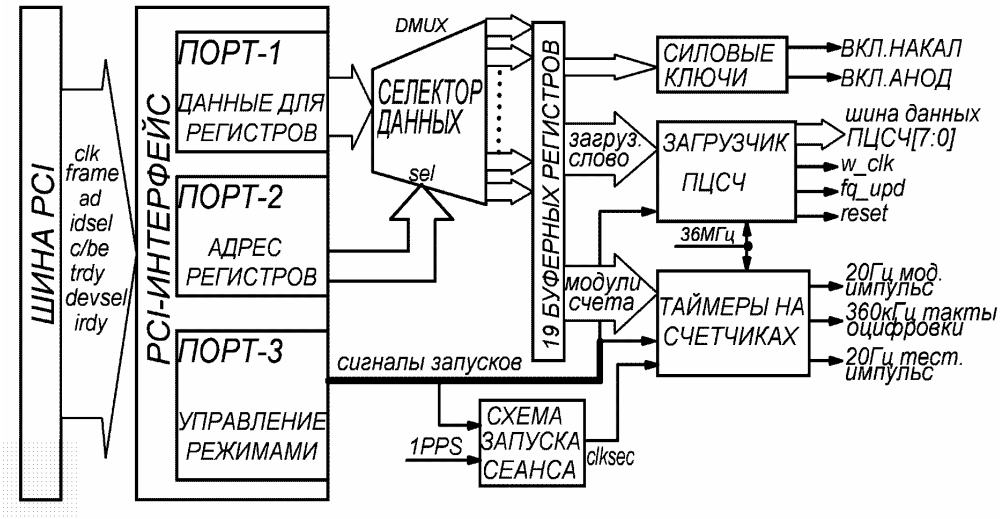


Рис. 2. Логическая схема системы управления в ПЛ СБИС

СБИС ПЛ (рис. 2) на языке описания аппаратуры Verilog HDL в САПР - Quartus II. Схема в ПЛ СБИС состоит из четырех функциональных узлов: первый – интерфейс PCI (реализует соединение с компьютером через шину PCI), второй – силовые ключи для управления импульсным передатчиком (сигналы: «вкл. накал», «вкл. анод»), третий – загрузчик двух микросхем ПЦСЧ, четвертый – таймеры на счетчиках (вырабатывающие модулирующий импульс передатчика, тестовый импульс и стробы АЦП (360 кГц)).

Узел интерфейса PCI осуществляет начальную установку связи в процессе инициализации персонального компьютера, передачу данных от персонального компьютера к регистрам, определяющим параметры работы ионозонда. Применяемое нами windows-приложение может работать только с шестнадцатью разрядами шины данных, поэтому для более простой работы с шиной PCI используется трехпортовая схема. Наполнение обязанностей этих портов следующее: порт-1 или адрес задействован для данных, направляемых в буферные регистры; порт-2 – для внутренней субадресации или для выбора конкретного буферного регистра и стробирования записи в него; порт-3 – для управления схемы запуска сеанса, запуском загрузчика двух микросхем ПЦСЧ и таймеров на счетчиках.

Работа таймеров на счетчиках показана с помощью временной диаграммы вырабатываемых сигналов (рис. 3). На ней представлены модулирующий импульс передатчика, стробирующие импульсы АЦП и тестовый импульс. Для обозначения сигналов использовались названия, соответствующие Verilog-коду.

Сеанс зондирования ионозонда должен начаться с выставления сигнала start, дающего возможность секундному импульсу clksec от GPS-синхронометра (по сигналу 1 PPS) запустить сеанс зондирования (рис. 3, участок 1). После окончания сеанса зондирования схема управления должна снять сигнал start (рис. 3, участок 5), для предотвращения запуска нового сеанса по первому сигналу clksec.

После старта сеанса зондирования схема управления таймеров должна выработать все остальные сигналы, показанные на рис. 3 (s20, s360k, s20_short, s360k_short, init_range). Эти сигналы создаются на основе тактирующей частоты 36 МГц, вырабатываемой на дополнительной плате. Сигналы s20_short, s360k_short – вспомогательные, необходимые для выработки сигналов s20 (модулирующий импульс передатчика), s360k (стробы АЦП) соответственно. Сигнал init_range появляется с задержкой относительно s20 в интервале 0–4 мс с шагом 27,7 нс.

После прихода импульса clksec на следующий такт частоты (clk36m) происходит выдача импульса s20_short, а по переднему фронту s20_short происходит запуск сигналов s20, s360k, s360k_short. Расстояние между двумя импульсами s360k_short составляет 100 тактов clk36m (что соответствует 360 кГц). Генерация импульсов s360k_short прекращается после выработки заданного количества импульсов (256*6 шт) независимо от длительности импульса s20

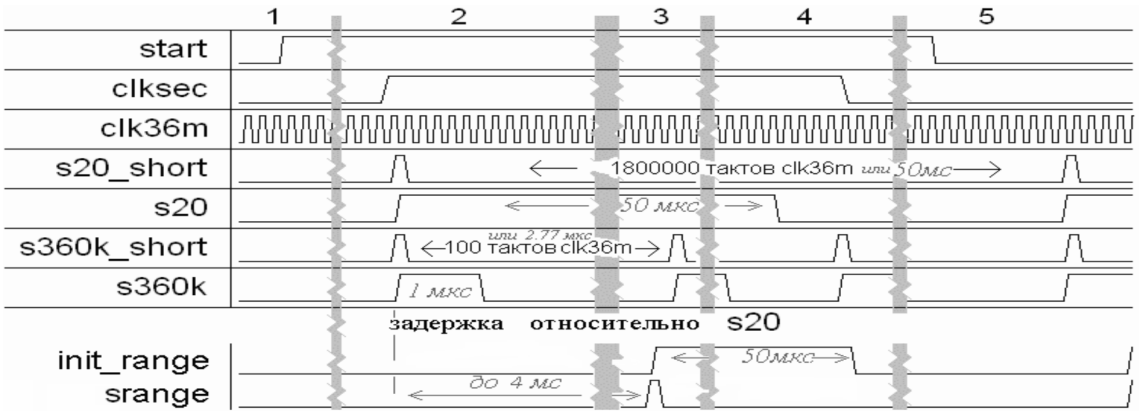


Рис. 3. Временная диаграмма работы схемы управления ПЛ СБИС
start – строб запуска по секундной метке clksec; clk36m – тактирующая частота (36 МГц);
s20 – модулирующий импульс передатчика; s360 – стробы АЦП (360 кГц);
init_range – сигнал, имитирующий отражение от ионосферы; s20_short, s360k_short и srange –
вспомогательные импульсы для образования сигналов s20, s360k и init_range соответственно

(рис. 3, участок 4). Цикл генерации сигналов s360k_short каждый раз повторяется по фронту импульса s20_short. Сам сигнал s20_short появляется через 1 800 000 тактов clk36m (что соответствует 20 Гц частоте модулирующих импульсов). Отметим, что все указанные частоты и длительности могут быть изменены через перезагрузку буферных регистров через PCI порты. Но для простоты указаны частоты и длительности наиболее типичные для работы ионозонда.

Verilog-код схемы таймеров на счетчиках не приводится в связи с ограниченным объемом статьи, рассмотрим лишь код узла – загрузчика двух микросхем прямого цифрового синтеза частот AD9851. Для загрузки одной микросхемы 40-битовое слово настройки (tuning word) надо подавать в виде последовательной посылки 5 байт [3]. В нашей схеме загрузка AD9851 идет в два этапа: сначала через PCI-шину загружается 40-битовое слово в буферные регистры, а затем по команде из порта управления загрузчик ПЦСЧ побайтно отгружает слово настройки в AD9851. Согласно техническому описанию микросхемы AD9851 [3] установка каждого байта подтверждается (стробируется) единичным состоянием на выводе W_Clk микросхемы. После установки последнего пятого байта слова настройки микросхемы вывод FqUp переводится в единичное состояние. На нашей плате используется две микросхемы ПЦСЧ [3], поэтому необходимо два сигнала W_Clk (в представленном коде – это w_clk_1 и w_clk_2). Сигнал FqUp является общим, и для него в коде используется идентификатор fq_upd_ddss.

Последовательный характер загрузки наталкивает на запись алгоритма схемы в виде цикла, принятого в классическом программировании, когда с ростом переменной цикла выполняются различные последовательные действия. В языке Verilog все тактируемые операции осуществляются в рамках программной конструкции *always* (рис. 4). Стробирование осуществляется передним фронтом clk36m. За рост переменной цикла *i* отвечает нижняя конструкция *if*, которая сбрасывает переменную *i* в 0 каждый раз после достижения ею значения 15. Верхняя конструкция *if* не позволяет переменной снова начать расти (рост возможен только при $I > 0$). Старт роста возможен только при единичном сигнале load. В конструкции *case* при росте *i* первые пять действий осуществляют последовательную посылку 5 байт слова загрузки ПЦСЧ1 через шину PCI, вторые пять действий – слова загрузки ПЦСЧ2.

Дополнительная плата

Дополнительная плата спроектирована для стыковки отладочного комплекта с исполнительными устройствами ионозонда и подключается к отладочному комплекту через разъемы *j3–j5* (рис. 5). Из-за различий в питании ПЛ СБИС (3,3 В) и старых блоков комплекса «Циклон» (5 В) при передаче логических сигналов необходимо конвертирование 3,3 В уровней в 5 В ТТЛ-уровни. В качестве таких конверторов на дополнительной плате были размещены микросхемы SN74LVCC3245A (DD1–DD7) (рис. 5). Выбор данной КМОП микросхемы обусловлен ее боль-

```
always @ (posedge clk_div3_1)
 if ( load | (i>0) )
   begin
      if (i<15)     i <= i+1;
      else      i <= 0;
    case (i)
     1:   {w_clk_1, data_bus_ddss} <= {1'b1, data_in_dds1[39:32]};
     2:   {w_clk_1, data_bus_ddss} <= {1'b1, data_in_dds1[31:24]};
     3:   {w_clk_1, data_bus_ddss} <= {1'b1, data_in_dds1[23:16]};
     4:   {w_clk_1, data_bus_ddss} <= {1'b1, data_in_dds1[15:8]};
     5:   {w_clk_1, data_bus_ddss} <= {1'b1, data_in_dds1[7:0]};

     7:   {w_clk_2, data_bus_ddss} <= {1'b1, data_in_dds2[39:32]};
     8:   {w_clk_2, data_bus_ddss} <= {1'b1, data_in_dds2[31:24]};
     9:   {w_clk_2, data_bus_ddss} <= {1'b1, data_in_dds2[23:16]};
     10: {w_clk_2, data_bus_ddss} <= {1'b1, data_in_dds2[15:8]};
     11: {w_clk_2, data_bus_ddss} <= {1'b1, data_in_dds2[7:0]};
     default: { w_clk_1, w_clk_2, data_bus_ddss} <= 10'b00_0000_0000;
    endcase
          if (i==14) fq_upd_ddss<=1;
          else      fq_upd_ddss<=0;
 end
```

Рис. 4. Фрагмент Verilog-кода схемы, отвечающий за загрузку микросхем ПЦСЧ

шим выходным током, достаточным для управления устройствами «Циклона» (в основном, ТТЛ схемами 155 серии). Дополнительно эти микросхемы выполняют роль буферов, ограждающих ПЛИС от внешних воздействий.

Кроме конверторов на дополнительной плате размещены следующие узлы. Это и упоминаемая ранее схема формирователя-распределителя тактовых частот, две микросхемы ПЦСЧ со своими фильтрами-усилителями, необходимыми для работы передатчика и приемника «Катран» соответственно, схема выработки тестового сигнала и узел силовых ключей для управления работой передатчика («Вкл. накал», «Вкл. анод»).

Основу схемы формирователя-распределителя составили следующие микросхемы (см. рис. 5): AD8561 – компаратор (DA10), SN65LVDS150 – умножитель с петлей ФАПЧ (DD11) и AD9513 – три независимых делителя частоты в одном корпусе (DD12). Имеющийся источник опорной частоты генерирует сигнал синусоидальной формы, и для перевода его в прямоугольную форму применен компаратор AD8561 с парафазным выходом. Особенностью и умножителя DD11, и делителя DD12 является «джамперное» (с помощью перемычек) управление коэффициентом умножения/деления, что позволяет легко менять коэффициенты умножения (от 4 до 20) и деления (от 2 до 31) соответственно в случае смены источника опорной частоты. В качестве тактовых частот в блоке управления используются 30 МГц и 36 МГц при частоте входного опорного сигнала 10 МГц. Исходя из возможных диапазонов частот и коэффициентов умножения/деления, была выбрана следующая схема: частота опорного сигнала умножается на 18 и затем делится на 6 и на 5 соответственно.

LVDS-приемник на входе AD9513 позволяет принимать ей тактовые частоты до 800 МГц, а возможность задавать тип выходного интерфейса (LVDS или КМОП) позволяет передавать тактирующий сигнал непосредственно к микросхеме ПЦСЧ, работающей с КМОП уровнями.

Возбудитель передатчика и первый гетеродин «Катрана» размещены на дополнительной плате и выполнены на микросхемах ПЦСЧ AD9851 (с максимальной частотой тактирования 180 МГц). Загрузка обеих микросхем осуществляется согласно коду, приведенному выше (см. рис. 4).

Известно, что ПЦСЧ микросхемы вырабатывают сигнал с недостаточно чистым спектром. Так, в соответствии с [3] размер динамического диапазона свободного от искажений (SFDR – *Spurious-Free Dynamic Range*) меняется в интер-

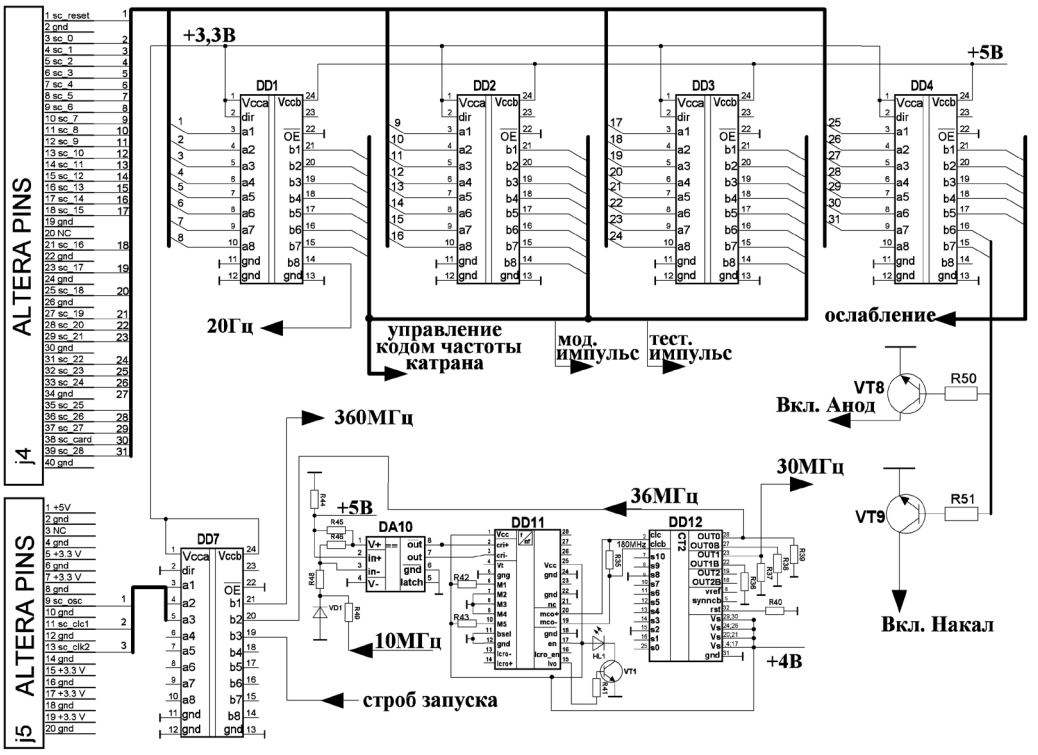


Рис. 5. Принципиальная схема дополнительной платы

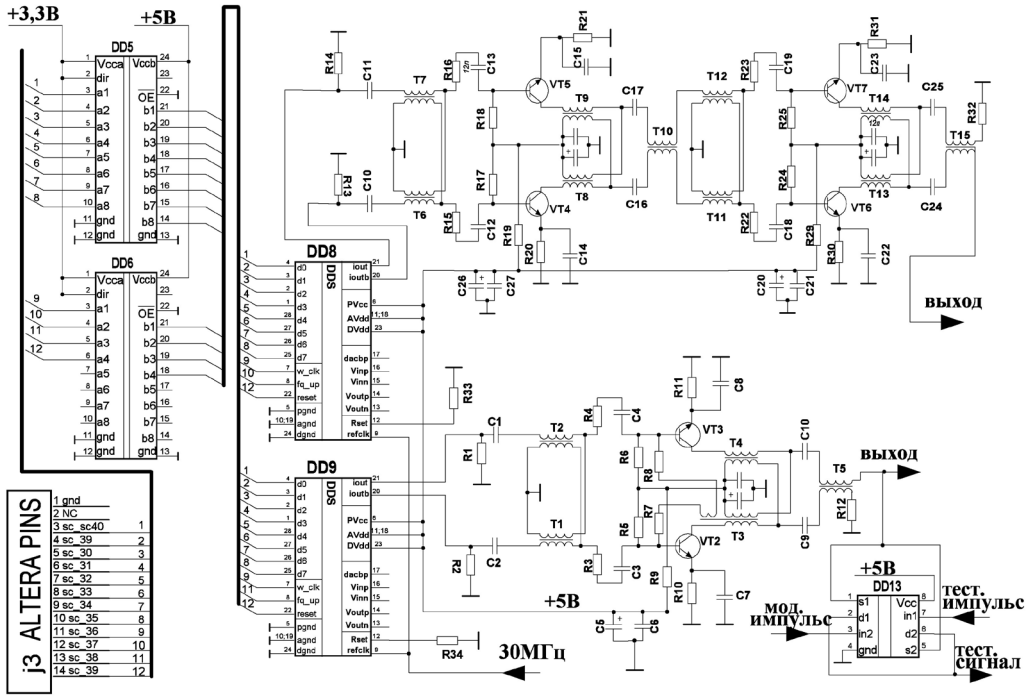


Рис. 5 (продолжение). Принципиальная схема дополнительной платы

вале 70–80 дБ в зависимости от выходной частоты 1–70 МГц (при опорной частоте 180 МГц). Для достижения таких показателей, по-видимому, нужна очень тщательная работа по экранировке ПЦСЧ, фильтрации питания и т. д. На нашей плате весь акцент по снижению шумовых составляющих был перенесен на выбор схемы усилителя, подключенного к выходу AD9851. Была использована двухтактная схема, которая, как известно, имеет высокую степень подавления четных гармоник. Два усилителя на дискретных элементах по данной схеме (на рис. 5 – это усилитель-фильтр 1 и усилитель-фильтр 2) позволили достичь SFDR не хуже 60–65 дБ (данные получены с помощью цифрового спектроанализатора «GW INSTEK SPECTRUM ANALIZER GSP-810 1000MHz»).

Схема выработки тестового импульса основана на микросхеме модулятора – ADG721 (DD13, два КМОП-ключа в одном корпусе). На затвор первого ключа подается модулирующий импульс передатчика (s20), на затвор второго – тестовый импульс (inint_range). На вход обоих ключей поступает сигнал возбудителя передатчика, а выходы объединяются, таким образом, на выходе модулятора получаем два радиоимпульса, сдвинутые относительно друг друга на заданный интервал времени.

Проверка методики повышения высотного разрешения

Проверка заключалась в подаче тестового зондирующего импульса, задержанного относительно модулирующего («излученного»), на вход приемника Р-399. Тестовый импульс (сигнальный провод init_range, вырабатываемый в СБИС ПЛ) может быть задержан относительно модулирующего импульса передатчика в интервале 0–4 мс с шагом 27,7 нс (или 4,165 м). Такой шаг по времени (высоте) с запасом превышает точность регистрирующей части комплекса. С помощью КМОП-ключа (ADG721), управляемого сигналом init_range, создается радиосигнал, подаваемый на вход приемника.

В ходе эксперимента создавалась «искусственная» тестовая ионограмма из 400 «излученных» тестовых импульсов, где каждый последующий импульс был сдвинут относительно предыдущего на 0,1 км. Таким образом, общий рост высоты для одной тестовой ионограммы составил 40 км. Величина среднеквадратичного отклонения, определенная по всем 400 значениям (на множестве тестовых ионограмм), от точных значений составила величину 0,197 км, что, примерно, в три раза хуже теоретического предела (~70 м) для использованной аппаратуры [1]. Применяя

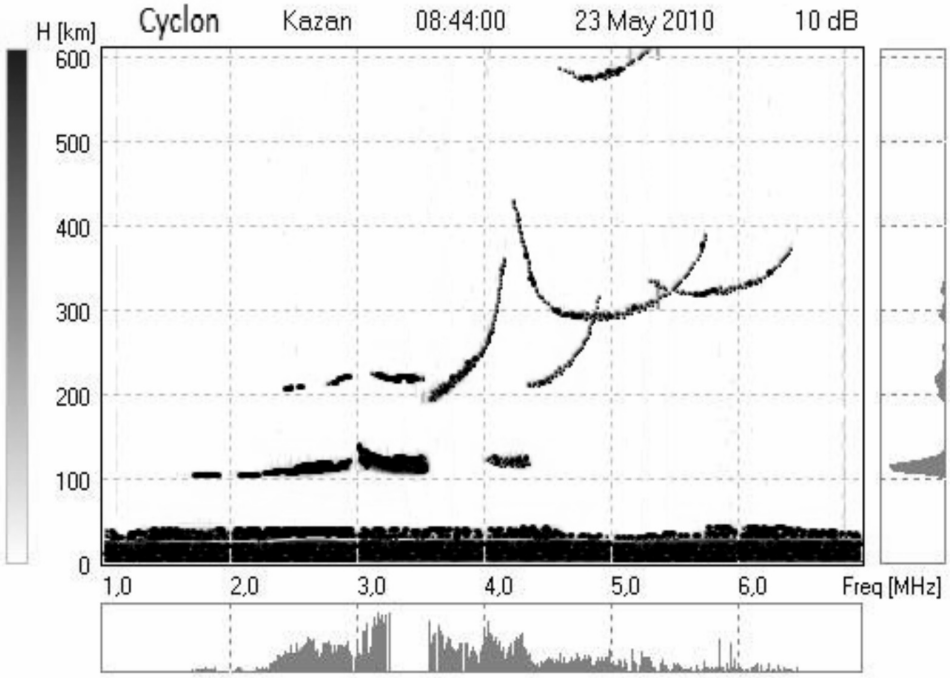


Рис. 6. Ионограмма, получаемая с помощью ионозонда «Циклон»

современные, более скоростные АЦП можно дополнительно повысить точность. Анализ нашей аппаратуры показал, что основным источником ошибок являются шумы на входе платы сбора информации E-440.

В результате выполненной работы по совершенствованию аппаратных средств были разработаны и изготовлены схемы системы управления ионозондом (управляемые через шину PCI). В новой системе управления использованы современные цифровые синусосинтезирующие микросхемы, обеспечивающие скорость и надежность работы. Основная часть управляющей схемы, в т. ч. и PCI-порты, размещена в микросхеме СБИС ПЛ путем конфигурации последней с помощью САПР. Кроме повышения надежности это дает возможность смены схемы блока управления без проведения каких-либо работ по перепайке элементов.

Система, позволяет реализовать не только обычное зондирование, но и методику повышения точности определения действующей высоты методом наибольшего правдоподобия в спектральной области. На тестовом сигнале достигнута точность 197 м, которая не является предельной, если применять более быстродействующие АЦП. Предлагаемый вариант определения временных задержек с повышенной точностью на основе метода наибольшего правдоподобия может быть использован на любой аппаратуре, измеряющей временные задержки.

Система управления ионозондом «Циклон» тестировалась на протяжении двух месяцев. Все спроектированные блоки и схемы показали свою работоспособность. Система работает в круглосуточном автоматическом режиме в течении 8 месяцев. Ежеминутно снимаются высотно-частотные характеристики ионосферы или ионограммы, пример одной из которых приведен на рис. 6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Akchurin, A.D.** Improved precision of virtual height measurements with coherent radio pulse sounding based on the maximum likelihood method [Текст]/ A.D. Akchurin, V.V. Bochkarev, E.Yu. Ryabchenko [et al.]//Advance in Space Research.–2009 (doi:10.1016/j.asr.2008.07.020)

2. **Акчурин, А.Д.** Повышение высотного разрешения импульсного ионозонда при зондировании когерентными импульсными сигналами [Текст]/ А.Д. Акчурин, В.В. Бочкарев//Ученые записки КГУ. –2008.–Т.150.–Кн.3.–С.5–12.

3. Техническое описание микросхемы AD9851 [Электронный ресурс] http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9851.pdf)

УДК 519.8

В.А. Матвеев

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНУСНОЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ В МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ

В сложных технических, производственных, социально-экономических и других системах крайне важным является выработка алгоритма последовательного или позиционного принятия решений. Любые методы, которые помогают человеку лучше понять, как меняются его предпочтения и доступные ресурсы в процессе функционирования системы, являются полезными, а иногда – и просто неоценимыми. Но в большинстве задач управления представлены «мгновенные, статические» конфликтные проблемы [1, с. 81–140]. В них не учитывается изменение объекта управления с течением времени. Это относится и к многокритериальным задачам. Однако в большинстве реальных задач с течением времени изменяется и сама управляемая система и предпочтения ЛПР (лица, принимающего решение), ибо «все течет, все движется и ничего не остается неизменным» [2, с. 214–219]. Процессы, в которых учитываются изменения, связанные с возрастани-

ем времени, называют «динамическими».

Пусть задана линейно-квадратичная, динамическая m – критериальная задача:

$$\Gamma = \left\langle \ \Sigma,\ U,\ \{J^{(i)}\}_{i\in M} \ \right\rangle. \qquad (1)$$

Аналогичная задача рассматривалась в [3, с. 215–232]. Здесь $M = \{1, ..., m\}$ множество критериев ЛПР. В задаче Γ динамика управляемой динамической системы Σ описывается системой n линейных дифференциальных уравнений и начальными условиями:

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)u, \qquad (2)$$

$$x(t_0) = x_0. \qquad (3)$$

Элементы квадратной матрицы $A(t)$, порядка n, предполагаются непрерывными функциями на отрезке времени $[t_0, \vartheta]$, т. е. $A(t) \in C_{n\times n}[t_0, \vartheta]$. Матрица $B(t) \in C_{n\times k}[t_0, \vartheta]$. Здесь $0 \le t_0 < \vartheta$ – фиксированные моменты начала и окончания процесса. Текущее состояние системы Σ, в каждый момент времени $t \in [t_0, \vartheta]$, характеризуется фазовым вектором $x = (x_1, ..., x_n) \in R^n$. Этот вектор зависит от времени, т. е. $x(t) = (x_1(t), ..., x_n(t))$ и представляет всю информацию, которой располагает ЛПР в момент $t \in [t_0, \vartheta]$. Задана начальная позиция $(t_0, x_0) \in [0, \vartheta] \times R^n$.

В (2)–(3) представлено изменение вектора состояния $x = (x_1, ..., x_n) \in R^n$ под воздействием управления $u = u(t, x)$. Дифференциальное уравнение (2) предъявляет определенные требования к «функциональной природе» управлений. Управляющее воздействие отождествляется с вектор-функцией $u(t, x) = Q(t)x$ где элементы $k \times n$ матрицы $Q(t)$ предполагаются непрерывными для $t \in [t_0, \vartheta]$. Множество его стратегий:

$$U = \{\, u = Q(t)x \mid Q(t) \in C_{k\times n}[t_0, \vartheta] \,\}. \qquad (4)$$

В управляемой системе Σ используется управление по принципу обратной связи, т. е. управление, зависящее от ситуации $(t, x) \in [t_0, \vartheta] \times R^n$. В то же время применяется наиболее простой вид таких стратегий – линейных по фазовому вектору и непрерывных по времени. «Математические» и «инженерные» причины такого выбора управлений подробно представлены в литературе [2, с. 247–252; 3, с.10].

Управляемый процесс реализуется следующим образом. Вначале ЛПР выбирает и использует позиционное управление $u = Q(t)x \in U$. Согласно (4), выбор управления сводится к выбору конкретной функциональной матрицы $Q(t) \in C_{k\times n}[t_0, \vartheta]$. При таком выборе (2) превращается в систему линейных однородных дифференциальных уравнений. При заданном начальном условии (3) такая система имеет [4, с. 21–24] единственное, непрерывно дифференцируемое решение $x^*(t)$, продолжимое на весь интервал $[t_0, \vartheta]$. Затем, с помощью найденного решения $x^*(t) \in C[t_0, \vartheta]$ выявляется реализация управления $u^* = Q(t)x^*(t)$.

На наборах $(x^*(t), u^*(t, x(t)))$ определены m критериев, заданные квадратичными функционалами:

$$J_i(u, t_0, x_0) = x^{\mathrm{T}}(\vartheta)C_i x(\vartheta) + \\ + \int_{t0}^{\vartheta} u^{\mathrm{T}}(t, x(t))D_i u(t, x(t))dt, \quad i \in M. \qquad (5)$$

Здесь C_i, D_i, $i \in M$ – постоянные квадратные симметричные матрицы порядка n и k соответственно; Т здесь и далее означает транспонирование. Слагаемое $\int_{t0}^{\vartheta} u^{\mathrm{T}}(t, x(t))D_i u(t, x(t))dt$ называется *интегральным*, а $x^{\mathrm{T}}(\vartheta)C_i x(\vartheta)$ – *терминальным* слагаемым критерия $J_i(u, t_0, x_0)$, $i \in M$.

На содержательном уровне, цель ЛПР – выбор такого управления $u(t, x) \in U$, при котором все критерии $J_i(u\ (t, x), (t_0, x_0), i \in M$, принимают возможно большие значения. Учитывая (2)–(5), задача (1) называется *линейно-квадратичной*, *динамической m-критериальной задачей*.

Многокритериальная задача (1) – задача с неполной информацией по сравнению со стандартной задачей математического программирования. Неопределенность связана с векторным критерием, т. е. с отсутствием единого целевого функционала. Неопределенность можно сокращать или даже снимать, используя дополнительную информацию.

Обычно решением многокритериальной задачи (1) считают оптимальное по Парето решение, как это показано в [5, с. 29]. Такие решения входят в класс оптимальных по конусу решений. Среди последних решений можно проводить процедуру уточнения, как это определено в [6, с. 172–175]. Такая процедура позволяет существенно сократить множество претендентов на наилучшее (оптимальное) управление или даже выделить единственное уточненное по конусу управление.

Один из возможных подходов связан с использованием экспертных оценок. От экспертов следует получать информацию об относительной важности критериев. Каждому критерию

M = {1, ..., *m*} эксперт ставит в соответствие неотрицательное число – весовой коэффициент, указывающий важность критерия относительно других критериев. Таким образом, эксперт формирует вектор весовых коэффициентов для всех *m* критериев. Пусть сформировано *m* таких векторов, составленных из весовых коэффициентов. Они составляют квадратную матрицу *A*, у которой *i*-я строка определяется *i*-м экспертом. Матрица *A* является матрицей отношений экспертов к критериям в задаче (1). Такая матрица задает (полиэдральный) конус доминирования, аналогично [6, с. 170], в критериальном пространстве R^m.

В качестве оптимального решения динамической многокритериальной задачи (1) будем рассматривать уточненное по последовательности конусов (по последовательности матриц) управление, представленное по аналогии с определением 2 для «статической задачи» в [6, с. 172]. Последовательность конусов, реализующая процесс уточнения решения, задается степенями матрицы *A*. По аналогичной схеме уточняется решение и по последовательности для различных конусов. Здесь важно существование предельного конуса. Условия существования уточненного по последовательности конусов оптимального решения в многокритериальной задаче в «статическом» случае установлено в [6, с. 172].

Сформулируем достаточные условия существования уточненного по последовательности конусов оптимального управления в многокритериальной, динамической задаче (1). Для этого рассмотрим вспомогательную динамическую задачу

$$\Gamma_\alpha = \langle\ \Sigma,\ U,\ \rho_\alpha(u,t_0,x_0)\ \rangle, \qquad (6)$$

которая отличается от многокритериальной задачи (1) только скалярным критерием

$$\begin{aligned}\rho_\alpha(u,t_0,x_0) &= \textstyle\sum_{i=1}^m \alpha_i J_i(u,t_0,x_0) = \\ &= \textstyle\sum_{i=1}^m \alpha_i x^{\mathrm{T}}(\vartheta) C_i x(\vartheta) + \\ &+ \textstyle\sum_{i=1}^m \alpha_i \int_{t0}^{\vartheta} u^{\mathrm{T}}(t,x(t)) D_i u(t,x(t))dt = \\ &= x^{\mathrm{T}}(\vartheta) C(\alpha) x(\vartheta) + \int_{t0}^{\vartheta} u^{\mathrm{T}}(t,x(t)) D(\alpha) u(t,x(t))dt,\end{aligned} \qquad (7)$$

где $J_i(u, t_0, x_0), i \in M$, из (5); вектор $\alpha = (\alpha_1, ..., \alpha_m) \in R^m$; $C = C(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i C_i$; $D = D(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i D_i$.

Утверждение 1. Пусть матрица $A \in R_{m\times m}$ отношений экспертов к критериям в задаче (1) является неотрицательной, невырожденной, неразложимой, стохастической. Вектор $\alpha^{\mathrm{T}} = (\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_m)$, $\sum_{i=1}^m a_i = 1,\ \alpha_i > 0$, есть левый собственный вектор, относящийся к максимальному собственному значению, и этот вектор $\alpha \in R_>^m$ (1, 2) определяет скалярный критерий (7) в динамической задаче (6). Тогда оптимальное управление в задаче (6) является уточненным по последовательности конусов решением многокритериальной задачи (1).

Рассмотрим матрицу $A \in R_{m\times m}$ отношений экспертов к критериям в задаче (1). Не уменьшая общности, считаем ее стохастической. Для такой матрицы на основании утверждения 5 из [6, с. 173] существует предельная матрица и все ее строки равны $\alpha^{\mathrm{T}} = (\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_m)$, $\sum_{i=1}^m a_i = 1,\ \alpha_i > 0$. По аналогии с определением 2 из [6, с. 172], уточненным по последовательности конусов решением, определенным матрицей $A \in R_{m\times m}$, является управление $u^* = Q^*(t)x^*(t)$ такое, что

$$\begin{aligned}&\max_{u\in U} \rho_\alpha(u,t_0,x_0) = \max_{u\in U} \textstyle\sum_{i=1}^m \alpha_i J^{(i)}(u,t_0,x_0) = \\ &= \max_{u\in U} (\textstyle\sum_{i=1}^m \alpha_i x^{\mathrm{T}}(\vartheta) C_i x(\vartheta) + \\ &+ \textstyle\sum_{i=1}^m \alpha_i \int_{t0}^{\vartheta} u^{\mathrm{T}}(t,x(t)) D_i u(t,x(t))dt) = \\ &= \max_{u\in U} (x^{\mathrm{T}}(\vartheta) C(\alpha) x(\vartheta) + \\ &+ \textstyle\int_{t0}^{\vartheta} u^{T}(t,x(t)) D(\alpha) u(t,x(t))dt) = \\ &= x^{*\mathrm{T}}(\vartheta) C(\alpha) x^*(\vartheta) + \\ &+ \textstyle\int_{t0}^{\vartheta} u^{*\mathrm{T}}(t,x^*(t)) D(\alpha) u^*(t,x^*(t))dt = \\ &= \textstyle\sum_{i=1}^m \alpha_i J^{(i)}(u^*,t_0,x_0) = \rho_\alpha(u^*,t_0,x_0).\end{aligned} \qquad (8)$$

Приведенные равенства есть определение максимума функционала $\rho_\alpha(u, t_0, x_0)$ на допустимых управлениях $u = Q(t)x(t)$ в задаче (6), что и доказывает утверждение.

При изучении многокритериальной позиционной линейно-квадратичной динамической задачи (1) будем рассматривать квадратичные формы и соответствующие матрицы. В частности, выделим знакоопределенные квадратичные формы (матрицы) [7, с. 276]. Матрица $C(\alpha)$ называется положительно (отрицательно, неотрицательно, неположительно) определённой, если $\forall x \in R^n$ верно неравенство $x^{\mathrm{T}}C(\alpha)x > 0$ ($x^TC(\alpha)x < 0$, $x^{\mathrm{T}}C(\alpha)x \geq 0$, $x^{\mathrm{T}}C(\alpha)x \leq 0$) и это будет обозначаться $C(\alpha) > 0$ ($C(\alpha) < 0$, $C(\alpha) \geq 0$, $C(\alpha) \leq 0$).

На основании утверждения 1 получим условия существования уточненного по последовательности конусов управления в многокритериальной динамической задаче. Эти условия можно сформулировать с помощью подходящей модификации метода динамического программирования [3, с. 215–231].

Рассмотрим матрицу $A \in R_{m\times m}$ отношений экспертов к критериям в задаче (1). Ее можно считать стохастической. Для такой матрицы на

основании утверждения 5 из [6, с. 173] существует предельная матрица и все ее строки равны $\alpha^{\mathrm{T}} = (\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_m)$, $\sum_{i=1}^{m} a_i = 1,\ \alpha_i > 0$. С помощью набора чисел α определяются матрицы $C(\alpha)$, $D(\alpha)$ из (8).

Утверждение 2. Рассматривается линейно-квадратичная, динамическая m – критериальная задача (1). Пусть для матрицы $A \in R_{m\times m}$ отношений экспертов к критериям в задаче (1) левый собственный вектор таков, что соответствующие матрицы:

$$C = C(\alpha) = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i C_i \le 0,$$
$$D = D(\alpha) = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i D_i < 0. \qquad (9)$$

Тогда в задаче (1) при любом выборе начальной позиции $(t_0, x_0) \in [t_0, \vartheta) \times R^n$ существует уточненная по последовательности конусов с матрицей A оптимальная стратегия $u^* \in U$ из (4), и эта стратегия имеет вид

$$u^* = u^*(t, x) = -D^{-1}(\alpha) \cdot B^{\mathrm{T}}(t) \cdot \Theta(t) \cdot x, \qquad (10)$$

где $\Theta(t)$, $0 \le t \le \vartheta$ – решение матричного уравнения типа Риккати

$$\dot{\Theta} + A^{\mathrm{T}}(t) \cdot \Theta + \Theta \cdot A(t) - \Theta \cdot B(t) \cdot D^{-1}(\alpha) \cdot B^{\mathrm{T}}(t) \cdot \Theta = 0_{n\times n}, \qquad (11)$$
$$\Theta(\vartheta) = -2C(\alpha).$$

При выполнении условий (9) решение $\Theta(t)$, $0 \le t \le \vartheta$ системы (11) существует единственно и продолжимо на интервал $[t_0, \vartheta]$.

Доказательство. Согласно утверждению 1 нахождение уточненного по последовательности конусов управления сводится к построению оптимальной (максимизирующей) стратегии в задачи динамического программирования (6):

$$\max_{u\in U} \rho_\alpha(u, t_0, x_0) = \rho_\alpha(u^*, t_0, x_0).$$

Решение последней задачи будем искать согласно рецептам динамического программирования Беллмана [3, с. 215–228; 8, с. 366–369]. Введем скалярную функцию:

$$W(t, x, u, V) = \frac{\partial V}{\partial t} + \left[\frac{\partial V}{\partial x}\right]^{\mathrm{T}} \times \left[A(t) \cdot x + B(t) \cdot u\right] + \frac{1}{2} u^{\mathrm{T}} \cdot D(\alpha) \cdot u. \qquad (12)$$

Здесь $V = V(t, x)$ – некоторая неизвестная скалярная функция. Оптимальное (максимизирующее) управление в задаче динамического управления (6) найдем из условия:

$$\max_{u\in U} W(u, t_0, x_0) = W(u^*, t_0, x_0).$$

Для нахождения оптимального управления используем достаточные условия максимума, т. е.

$$\frac{\partial W}{\partial u} = B^{\mathrm{T}} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + D \cdot u = 0, \qquad (13)$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial u^2} = D < 0. \qquad (14)$$

Неравенство (14) означает, что матрица D отрицательно определена, и это свойство выполнено в силу (9). Из (13) следует, что

$$u^* = -D^{-1} \cdot B^{\mathrm{T}} \cdot \frac{\partial V}{\partial x}. \qquad (15)$$

Как принято для линейно-квадратичных задач, будем считать, что функция $V = V(t, x)$ имеет вид:

$$V = V(t, x) = \frac{1}{2} x^{\mathrm{T}} \cdot \Theta(t) \cdot x. \qquad (16)$$

Здесь неизвестной величиной является симметрическая матрица $\Theta = \Theta(t)$, элементы которой есть функции от $t \in [t_0, \vartheta]$.

Тогда из (15), (16) следует (10):

$$u^* = u^*(t, x) = -D^{-1}(\alpha) \cdot B^{\mathrm{T}}(t) \cdot \Theta(t) \cdot x.$$

Подставляя u^* из (15) и V из (16) в равенства $W(t, x, u^*, V) = 0$, $V(\vartheta, x) = \frac{1}{2} x^T \cdot C(\alpha) \cdot x$, где функция $W(t, x, u^*, V)$ задана в (12), получаем, что матрица $\Theta(t) \in C_{n\times n}[t_0, \vartheta]$ удовлетворяет (11). По условию выполнены неравенства (9). В этом случае матричное уравнение типа Риккати и начальное условие (11) определяют [9, с. 207] единственное решение, продолжимое на интервал $[t_0, \vartheta]$.

Утверждение 3. Рассматривается линейно-квадратичная, динамическая m-критериальная задача (8.1). Пусть

$$C_i \le 0, \quad D_i < 0, \quad \forall i \in M. \qquad (17)$$

Отношение экспертов к критериям в задаче представлено произвольной стохастической неразложимой квадратной матрицей $A \in R_{m\times m}$. Тогда при любом выборе начальной позиции $(t_0, x_0) \in [0, \vartheta) \times R^n$ существует уточненная по конусу с матрицей A оптимальная стратегия $u^* \in U$ из (4), и эта стратегия имеет вид (10), где $\Theta(t)$, $0 \le t \le \vartheta$ – решение матричного уравнения типа Риккати (11). В этом случае решение $\Theta(t)$, $0 \le t \le \vartheta$ системы (11) существует единственно и продолжимо на интервал $[t_0, \vartheta]$.

Для любой стохастической неразложимой квадратной матрицы $A \in R_{m\times m}$, представляющей отношение экспертов к критериям задачи, предельная матрица однозначно определяется левым собственным вектором, относящимся к мак-

симальному собственному значению $\lambda^* = 1$ и этот вектор

$$\alpha^{\mathrm{T}} = (\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_m),\ \ \sum_{i=1}^{m}\alpha_i = 1,\ \ \alpha_i \ge 0.$$

Тогда из того, что $\forall i \in M$ матрицы $C_i \le 0$, и $D_i < 0$, следует (9). Таким образом, выполнены условия утверждения 2, что и завершает доказательство утверждения.

Утверждение 4. Рассматривается линейно-квадратичная, динамическая *m*-критериальная задача (1). Пусть $\forall i \in M$ собственные значения матрицы C_i неположительные, а у матрицы D_i они отрицательны. Отношение экспертов к критериям в задаче представлено произвольной стохастической неразложимой квадратной матрицей $A \in R_{m\times m}$. Тогда при любом выборе начальной позиции $(t_0, x_0) \in [0, \vartheta) \times R^n$ существует уточненная по конусу с матрицей A оптимальная стратегия $u^* \in U$ из (4), и эта стратегия имеет вид (10), где $\Theta(t)$, $0 \le t \le \vartheta$ – решение матричного уравнения типа Риккати (11). В этом случае решение $\Theta(t)$, $0 \le t \le \vartheta$ системы (11) существует единственно и продолжимо на интервал $[t_0, \vartheta]$.

Доказательство следует из того, что условие (17) равносильно существованию только неположительных собственных значений у матриц $C_i, i \in M$ и только отрицательных собственных значений у матриц $D_i, i \in M$.

Пример. Рассматривается линейно-квадратичная, динамическая двухкритериальная задача (1), именно, $\Gamma = \langle\ \Sigma,\ U,\ \{J^{(i)}\}_{i=1,2}\ \rangle$. Здесь динамика управляемой динамической системы Σ описывается системой двух линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u(t,x).$$

Вектор состояния системы $x = (x_1, x_2) \in R^2$. Задан промежуток функционирования $t \in [0, 2]$. Скалярное управление с полной обратной связью представлено в (4) $u(t, x) = Q(t)x = q_1x_1 + q_2x_2$. Ограничения на управление отсутствуют. На реализованных траектории и управлении динамической системы $(x^*(t), u^*(t, x(t)))$ определены два критерия, заданные квадратичными функционалами:

$$J_1(u, t_0, x_0) = x^{\mathrm{T}}(2)Cx(2),\ C = \begin{pmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -3 \end{pmatrix},$$

$$J_2(u, t_0, x_0) = \int_0^2 u^{\mathrm{T}}(t, x(t)) \cdot D \cdot u(t, x(t))dt,\ D = -1.$$

Будем использовать обозначения

$$J_1(u, 0, x_0) = -2x_1^2(2) - 3Cx_2^2(2),$$

$$J_2(u, 0, x_0) = -\int_0^2 u^2(t, x(t))dt.$$

На содержательном уровне цель ЛПР в этой задаче состоит в выборе такого управления $u(t, x) \in U$, при котором оба критерия примут возможно большие значения. Представленная задача является линейно-квадратичной, динамической двухкритериальной задачей.

В качестве решения задачи будем рассматривать уточненное по конусу решение. Это уточнение определяется на основе экспертных оценок. Пусть эксперты представили свои предпочтения стохастической матрицей:

$$A = \begin{pmatrix} 3/5 & 2/5 \\ 4/5 & 1/5 \end{pmatrix}.$$

В этой матрице приведены мнения двух экспертов о критериях: первый эксперт оценивает важность критериев $J^{(1)}$ и $J^{(2)}$ как 3:2, а второй эксперт – как 4:1. Такая информация сокращает неопределенность относительно цели операции, но не снимает ее полностью. Наилучший компромисс мнений экспертов устанавливает левый собственный вектор матрицы A:

$$\lim_{n\to\infty} A_n \cdot A_{n-1} \cdot, ..., \cdot A_1 = \lim_{n\to\infty} A^n = A_0 = \begin{pmatrix} 2/3 & 1/3 \\ 2/3 & 1/3 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, компромиссное решение экспертов состоит в оценке важности критериев как 2:1.

Согласно утверждению 1, управление

$$u^*(t) \in \arg\max_{u(t)\in U} (2/3\, J^{(1)}(u(t), 0, x_0) + 1/3\, J^{(2)}(U(t), 0, 0))$$

является уточненным по последовательности конусов (по последовательности матриц A) оптимальным (максимальным) решением многокритериальной задачи. Именно уточненное управление является решением линейно-квадратичной динамической задачи (6) при условии $\alpha = 2/3$, т. е.

$$\Gamma_{2/3} = \langle\ \Sigma,\ U,\ \rho_{2/3}(u, 0, x_0)\ \rangle,$$

$$\rho_{2/3}(u(t), 0, x_0) = 2/3\, J^{(1)}(u(t), 0, x_0) + 1/3\, J^{(2)}(U(t), 0, x_0).$$

Для линейно-квадратичной динамической двухкритериальной задачи выполнены условия

утверждений 2 и 3. Действительно, верно (9)

$$C(2/3) = 2/3\,C_1 + 1/3\,C_2 =$$
$$= 2/3\begin{pmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -3 \end{pmatrix} + 1/3\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} =$$
$$= \begin{pmatrix} -4/3 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix} \le 0,$$

$$D(2/3) = 2/3\,D_1 + 1/3\,D_2 =$$
$$= 2/3 \cdot 0 + 1/3 \cdot (-1) = -1/3 < 0.$$

Тогда в многокритериальной задаче при любом выборе начальной позиции $(t_0, x_0) \in [0, \vartheta) \times R^n$ существует уточненная по конусу с матрицей A оптимальная стратегия $u^* \in U$ из (4). Для ее нахождения составим матричное уравнение типа Риккати (11):

$$\dot{\Theta} + A^{\mathrm{T}}(t) \cdot \Theta + \Theta \cdot A(t) -$$
$$- \Theta \cdot B(t) \cdot D^{-1}(\alpha) \cdot B^{\mathrm{T}}(t) \cdot \Theta = 0_{n \times n},$$
$$\Theta(\vartheta) = -2C(\alpha).$$

Для уменьшения вычислительных трудностей при решении уравнения запишем его относительно неизвестной матрицы $\Theta^{-1} = \Theta^{-1}(t)$, при этом используем тождество $\dot{\Theta}^{-1} = -\Theta^{-1}(t) \cdot \dot{\Theta}(t) \cdot \Theta^{-1}(t)$. Аналогичное преобразование представлено в [8, с. 382]. В результате получаем задачу

$$\dot{\Theta}^{-1} - \Theta^{-1} A^{\mathrm{T}} - A\Theta^{-1} + BD^{-1}B^{\mathrm{T}} = O_{2\times 2},$$

$$\Theta^{-1}(\vartheta) = -\frac{1}{2}C^{-1}(\alpha)$$

или в координатной форме

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_{11} & \dot{q}_{12} \\ \dot{q}_{21} & \dot{q}_{22} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} -$$
$$- \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}\left(-1/3\right)^{-1}(0 \quad 1) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} q_{11}(\vartheta) & q_{12}(\vartheta) \\ q_{21}(\vartheta) & q_{22}(\vartheta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3/8 & 0 \\ 0 & 1/4 \end{pmatrix}.$$

После преобразований получаем начально-краевую задачу:

$$\dot{q}_{11} = 2q_{12}, \quad q_{11}(2) = 3/8,$$

$$\dot{q}_{12} = q_{22}, \quad q_{12}(2) = 0,$$

$$\dot{q}_{22} = -3, \quad q_{22}(2) = 1/4.$$

Ее решение

$$q_{11}(t) = -t^3 + \frac{25}{4}t^2 - 13t + \frac{75}{8},$$

$$q_{12}(2) = -\frac{3}{2}t^2 + \frac{25}{4}t - \frac{13}{2},$$

$$q_{22} = -3t + \frac{25}{4}.$$

или в матричной форме

$$\Theta^{-1} = \Theta^{-1}(t) = \begin{pmatrix} q_{11}(t) & q_{12}(t) \\ q_{21}(t) & q_{22}(t) \end{pmatrix} =$$
$$\begin{pmatrix} -t^3 + 6{,}25t^2 - 13t + 9{,}375 & -1{,}5t^2 + 6{,}25t + 6{,}5 \\ -1{,}5t^2 + 6{,}25t + 6{,}5 & -3t + 6{,}25 \end{pmatrix}.$$

Найдем обратную матрицу:

$$\Theta = \Theta(t) = \frac{1}{\Delta}\begin{pmatrix} q_{22}(t) & -q_{12}(t) \\ -q_{21}(t) & q_{11}(t) \end{pmatrix} =$$
$$= \frac{1}{\Delta}\begin{pmatrix} -3t + 6{,}25 & 1{,}5t^2 - 6{,}25t - 6{,}5 \\ 1{,}5t^2 - 6{,}25t - 6{,}5 & -t^3 + 6{,}25t^2 - 13t + 9{,}375 \end{pmatrix},$$

где $\Delta = 0{,}75t^4 - 6{,}25t^3 + 19{,}5t^2 - 28{,}125t + 16{,}34375$. Оптимальное управление определяется по формуле (10):

$$u^* = u^*(t, x) = -D^{-1}(\alpha) \cdot B^{\mathrm{T}}(t) \cdot \Theta(t) \cdot x = -(-1/3)^{-1}(0 \quad 1)\frac{1}{\Delta} \times$$
$$\times \begin{pmatrix} -3t + 6{,}25 & 1{,}5t^2 - 6{,}25t - 6{,}5 \\ 1{,}5t^2 - 6{,}25t - 6{,}5 & -t^3 + 6{,}25t^2 - 13t + 9{,}375 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} =$$
$$= \frac{4{,}5t^2 - 18{,}75t - 19{,}5}{\Delta}x_1 + \frac{-3t^3 - 18{,}75t^2 - 39t - 28{,}125}{\Delta}x_2$$

и $\Delta = 0{,}75t^4 - 6{,}25t^3 + 19{,}5t^2 - 28{,}125t + 16{,}34375$.

Таким образом, в данном примере найдено управление, доставляющее наилучшее компромиссное решение с позиций двух экспертов.

В статье рассмотрена линейно-квадратичная, динамическая многокритериальная задача. Наличие в ней m-критериев является выражением неопределенности в системе, именно неопределенности отношения предпочтения ЛПР. В классификации неопределенностей в задачах управления она выделена в [2, с. 24], как «неопре-

деленность, отражающая нечеткость знания игроками своих целей». Выявление единой целевой функции снимает эту неопределенность.

Процесс уточнения по последовательности конусов позволяет уменьшить неопределенность, а в пределе выявить единую целевую функцию. Такое уточнение существенно использует знания экспертов по рассматриваемой проблеме. Их мнения формализуются в форме матрицы отношений экспертов к критериям. Эта матрица и соответствующий ей многогранный конус позволяют свести m-критериальную проблему к стандартной задаче динамического управления.

Для последней задачи разработаны эффективные методы решения. В частности, в данном 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 оптимального управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воробьёв, Н.Н.** Современное состояние теории игр [Текст]/Н.Н. Воробьёв//Успехи матем. наук.–1970.–25. Вып. 2.–С. 81–140.

2. **Жуковский, В.И.** Риски и исходы в многокритериальных задачах управления [Текст]/В.И. Жуковский, М.Е. Салуквадзе.–Тбилиси: Интелекти, 2004.

3. **Жуковский, В.И.** Линейно-квадратичные дифференциальные игры [Текст]/В.И. Жуковский, А.А. Чикрий.–Киев: Наукова Думка, 1994.

4. **Понтрягин, Л.С.** Обыкновенные дифференциальные уравнения [Текст]/Л.С. Понтрягин.–М.: Наука, 1974.

5. **Ногин, В.Д.** Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход [Текст]/В.Д. Ногин.–М.: Физматлит, 2002.

6. **Матвеев, В.А.** Исследование оптимальности по конусу в многокритериальной задаче [Текст]/В.А. Матвеев//Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2009. –№ 4.–С. 169–176.

7. **Гантмахер, Ф.Р.** Теория матриц [Текст]/Ф.Р. Гантмахер.–М.: Наука, 1967.

8. **Пантелеев, В.И.** Теория управления в примерах и задачах [Текст]/В.И. Пантелеев, А.С. Бортаковский. –М.: Высш. шк., 2003.

9. **Ли, Э.Б.** Основы теории оптимального управления [Текст]/Э.Б. Ли, Л. Маркус. –М.: Наука, 1972.

УДК 004.942

А.Д. Таземдинов

О НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОНИМАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Формальное представление любого процесса, отражающее в математической форме важнейшие его свойства – законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям, и т. д. позволяет не только упростить задачи организации и управления этими процессами, но и существенно повысить качество такого управления [1].

Большой практический интерес для построения автоматизированных обучающих систем представляют математические модели процессов восприятия, понимания и забывания информации. В то же время разработка таких моделей сопряжена с целым рядом трудностей. Одна из которых связана с тем, что естественный язык человека наряду с преимуществами в осуществлении коммуникативной функции обладает и недостатками. К числу таких недостатков относятся многозначность слов, сложность грамматических норм, громоздкость и необозримость его конструкций, ситуативность многих конструкций, контекстнозависимое представление информации, небрежность употребления терминов и т. д.

В большинстве случаев подобные исследования сосредоточены в отдельных направлениях кибернетики и связаны с разработкой вероятностных способов скорости запоминания информации

при проверке остаточных знаний и на моделях забывания информации. Между тем, результаты многочисленных исследований когнитивной психологии говорят о том, что *понимание* учебного материала (УМ) является важнейшим фактором, влияющим как на скорость запоминания, так и на длительность хранения информации в памяти [2–4]. Существует множество работ, описывающих проблему *понимания* с философской и образовательной стороны, при недостаточной освещенности этой проблематики с точки зрения формального описания самого процесса. Поэтому в данной статье на основе теоретико-множественного подхода предлагается и исследуется математическая модель процесса *понимания* информации, что и определяет ее актуальность.

Математическая модель «*понятия*»

Под термином *понятие* в данной статье подразумевается следующее. *Понятие* – это символическое отображение существенных свойств, являющихся общими для определенного класса предметов, явлений или процессов окружающего мира, выделенных в результате сравнительной аналитической работы, систематизации и классификации. В каждом понятии свернуто особое предметное действие, воспроизводящее предмет познания посредством ментального представления.

Исходя из определения, предлагается математическая модель *понятия*, основанная на теоретико-множественном подходе:

$$\textit{понятие} = \langle A, L, V, R \rangle,$$

где A – обобщенное множество понятий (элементов), используемое для описания существенных свойств и характеристик определенного класса предметов, явлений или процессов, и отражающее сущность представляемого понятия; L – множество связей между элементами множества A, обеспечивающее логическую целостность, отличающую данную совокупность элементов от среды, и приобщающую к этому системообразующему, интегративному свойству каждый из элементов множества A; V – множество элементов, которые называются свойствами (двуместными предикатами), $V \subseteq A$; R – множество высказываний (аксиом), назначающих каждому элементу множества V множество элементов из множества A, к которым оно применимо, и множество элементов или *литералов* (примитивных типов, таких, как строки и числа), которые могут быть их значениями.

В качестве формы представления структурной основы *понятия*, обеспечивающей смысловую связь его частей, предлагается использовать графы понятий. Каждая вершина такого графа содержит одно понятие (семантическую единицу информации), которое в свою очередь может быть также представлено в виде графа, имеющего свои собственные исходные вершины (свои семантические единицы информации, изученные на предыдущих этапах обучения). Каждая дуга графа есть не что иное, как символ отношения (связи) между понятиями, которые она соединяет. Связи между понятиями могут быть не только прямыми, но и транзитивными (иерархическими, косвенными), когда путь между двумя вершинами (понятиями) содержит больше одной дуги. В дальнейшем, поскольку речь идет о понятиях учебного материала и их связях, а графовая модель является лишь математическим аппаратом и средством визуализации этих связей, для обозначения дуг и путей на графе понятий будет использоваться термин – *связь и длина связи* (минимальная длина соответствует одной дуге графа).

Свойства модели *понятия*

Одной из основных характеристик процесса понимания следует считать *субъективность оценки степени понимания*. Рассмотрим некоторое понятие $C(x) = \langle A_C(x), L_C(x), V_C(x), R_C(x) \rangle$ (идеализированное, обобщенное представление о данном понятии в целом) (рис.), где множество $A_C(x) = \{a_1, a_2, ..., a_n\}$ состоит из n понятий, $n \in N$ множеству натуральных чисел. Множество понятий, используемое преподавателем при изложении УМ, можно определить как $A(x) = \langle A_A(x), L_A(x), V_A(x), R_A(x) \rangle$, частично или полностью пересекающееся с $C(x)$.

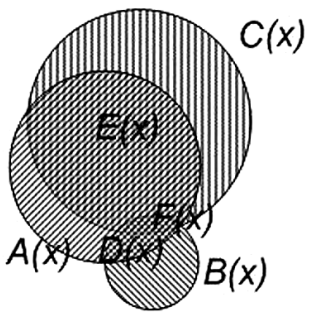


Рис. 1. Пересечение представлений о понятии
$C(x)$ – обобщенное представление о понятии x;
$A(x)$ – представление преподавателя о понятии x;
$B(x)$ – представление обучающегося о понятии x;
$E(x)=A(x)\cap C(x)$; $D(x)=A(x)\cap B(x)$; $F(x)= B(x)\cap C(x)$

Пересечение знаний о понятии вычисляется следующим образом:

$$E(x) = A(x) \cap C(x) =$$
$$= \langle A_E(x), L_E(x), V_E(x), R_E(x) \rangle =$$
$$= \begin{cases} A_E(x) = A_A(x) \cap A_C(x) \\ L_E(x) = L_A(x) \cap L_C(x) \\ V_E(x) = V_A(x) \cap V_C(x) \\ R_E(x) = R_A(x) \cap R_C(x) \end{cases}.$$

Количество понятий, знакомых обучающимся в изучаемой предметной области, определяется как $B(x) = \langle A_B(x), L_B(x), V_B(x), R_B(x) \rangle$. Явная очевидность разницы в степени понимания, тем не менее, возможна только на рисунке. Обычно при сравнении двух представлений возникают две субъективные оценки. Поэтому, также введем две оценки степени понимания понятия в виде функций принадлежности. «Верхнюю», с точки зрения множества с большим количеством элементов (в данном случае – с позиции преподавателя):

$$\mu_{up(A,B)}(x) =$$
$$= \frac{1}{4} \begin{cases} \left(\frac{k_{A\cap B}}{k_A} + \frac{m_{A\cap B}}{m_A} + \frac{n_{A\cap B}}{n_A} + \frac{l_{A\cap B}}{l_A} \right), \text{если} \quad k_A > k_B, \\ \left(\frac{k_{A\cap B}}{k_B} + \frac{m_{A\cap B}}{m_B} + \frac{n_{A\cap B}}{n_B} + \frac{l_{A\cap B}}{l_B} \right), \text{если} \quad k_B > k_A, \end{cases} \quad (1)$$

где k_A – количество элементов множества $A_A(x)$; m_A – количество элементов множества $L_A(x)$; n_A – количество элементов множества $V_A(x)$; l_A – количество элементов множества $R_A(x)$; k_B, m_B, n_B, l_B, – соответственно множеств $A_B(x)$, $L_B(x)$, $V_B(x)$, $R_B(x)$; $k_{A\cap B}$ – количество элементов пересечения множества $A_A(x) \cap L_B(x)$; $m_{A\cap B}$, $n_{A\cap B}$, $l_{A\cap B}$, – количество элементов пересечений соответствующих множеств $L(x)$, $V(x)$, $R(x)$.

И «нижнюю», с точки зрения множества с меньшим количеством элементов (самооценки, в данном случае – с позиции обучающегося):

$$\mu_{down(A,B)}(x) =$$
$$= \frac{1}{4} \begin{cases} \left(\frac{k_{A\cap B}}{k_B} + \frac{m_{A\cap B}}{m_B} + \frac{n_{A\cap B}}{n_B} + \frac{l_{A\cap B}}{l_B} \right), \text{если} \quad k_A > k_B, \\ \left(\frac{k_{A\cap B}}{k_A} + \frac{m_{A\cap B}}{m_A} + \frac{n_{A\cap B}}{n_A} + \frac{l_{A\cap B}}{l_A} \right), \text{если} \quad k_B > k_A, \end{cases}$$

Результаты вычислений количественных характеристик и оценок степени понимания для областей рисунка приведены в табл. 1 и 2.

Высокая степень субъективности «нижней» оценки приводит к тому, что для формирования объективной самооценки требуется уточнение внутренней модели понятия путем частичного или полного сравнения его с другими (внешними) моделями этого понятия. Поэтому процесс формирования самооценки описывается как

$$B_{up}(x) = B(x) \bigcup_{j=1}^{n} \bigcap_{i=j}^{n} A_{ji}(x).$$

В дальнейшем для всех оцениваний будет применяться «верхняя» оценка, как более объективная.

Таблица 1

Количественные характеристики областей знаний о понятии *x*

Параметры	$C(x)$	$A(x)$	$B(x)$	$D(x)$	$E(x)$	$F(x)$
k	50	45	8	4	40	2
m	58	51	9	5	46	1
n	19	19	7	5	17	2
l	24	25	10	7	20	3

Таблица 2

Сравнение «верхних» и «нижних» оценок степени понимания понятия *x*

Тип оценки	$\mu_{(A,B)}(x)$	$\mu_{(B,C)}(x)$	$\mu_{(A,C)}(x)$
up	0,18	0,83	0,07
down	0,62	0,87	0,24

При большом количестве элементов, содержащихся в понятии (x), используется частичное сравнение областей знаний. Введем понятие частичной оценки, которая вычисляется так же как и «верхняя» оценка по формуле (1), но на ограниченном подмножестве элементов большего множества и полном объеме элементов меньшего:

$$\mu_{up(A',B)}(x),$$

где $A'(x) \subset A(x)$ – подмножество элементов из множества $A_A(x)$ и связанные с ними элементы множеств $L_A(x)$, $V_A(x)$, $R_A(x)$.

На основании теоретико-множественного подхода и графовой формы представления модели понятия предлагаются следующие измеряемые параметры, кроме *количества понятий* (k) и *количества связей* (m), позволяющие проводить сравнения абсолютных показателей различных понятий:

• *Количество уровней разъяснения* (j). Язык изложения является одним из наиболее важных параметров, отвечающих за понимание. Для измерения сложности языка изложения разделим граф данного понятия на подграфы по уровням иерархии, каждый из которых объединит понятийные множества, необходимые для объяснения понятий вышележащего уровня. Графы первого уровня формируются из понятий множества $A_A(x)$, таким образом, что в множество X_1 должны входить только сложные понятия множества $A_A(x)$. Графы второго уровня формируются из понятий множеств X_1. Графы третьего уровня – из понятий множества X_2, необходимого для объяснения понятий множеств X_1. Графы j-го уровня – из понятий множества X_{j-1}, необходимого для объяснения понятий множества X_{j-1}. В этом случае, степень сложности языка изложения будет измеряться в количестве уровней графа, где нулевому уровню сложности соответствуют графы второго уровня. То есть, чем сложнее язык изложения, тем больше шагов рекурсивного спуска требуется для объяснения предыдущих понятий.

• *Количество сложных понятий* (p) в множестве $A_A(x)$ (не обиходных), которые могут вызвать затруднение при понимании и требуют дополнительных разъяснений.

• *Коэффициент сложности* (p') – отношение количества сложных понятий к простым:

$$p' = \begin{cases} \dfrac{p}{k-p}, & \text{если } k > p, \\ 0, & \text{если } k = p. \end{cases}$$

• На основании вышеописанных параметров введем *коэффициент общей трудоемкости* (r), как общее количество смысловых единиц, требующих изучения:

$$r = \sum_{i=0}^{j} \sum_{g_i=1}^{h_i} (k_{g_i} + m_{g_i} + n_{g_i} + l_{g_i}),$$

где j – количество уровней разъяснений; h – количество графов i-го уровня.

Введение этих параметров позволяет выполнить анализ и итерационную оптимизацию графа понятия, заключающуюся в уменьшении множества сложных понятий X_1 $p \to 0$ и сокращении *уровней разъяснения* так, чтобы $j \to 0$.

• *Связность смысловых элементов* определяется как отношение количества элементов множества $A_A(x)$ к количеству дуг графа или графов первого уровня:

$$s = n(k-1) \Big/ \sum_{i=1}^{n} m_i,$$

где n – количество графов первого уровня, k – количество элементов множества $A_A(x)$; $m_i = (V_i = (v_1, v_2, \ldots, v_m))$ число дуг i-го графа.

Для минимального графа, состоящего из графов первого и второго уровня, связность смысловых элементов будет рассчитываться по формуле:

$$s = \frac{n(k-1) + \sum_{i=1}^{k} h(z-1)}{\sum_{i=1}^{n} m_i + \sum_{i=1}^{k} \sum_{g=1}^{h} m_g},$$

где h – количество графов второго уровня, разъясняющих a_i понятие; $m_g = (V_g = (v_1, v_2, \ldots, v_g))$ – число дуг g-го графа.

Чем больше значение s, тем больше связанность. Значение $s < 1$ говорит о том, что материал слабо связан и требует реструктуризации либо разделения на части. Оптимальным можно считать $1 < s < 3$.

• *Структурированность*. Для множества понятий $A_A(x)$ определяются связи (дуги графа) первого и второго уровня. Связи первого уровня формируют иерархическую структуру, идеальной топологией которой является дерево. Связи второго уровня обеспечивают дополнительную естественно-смысловую связанность понятий и условно считаются второстепенными. Величина показателя вычисляется из связей первого уровня, как показатель сформированности дерева (отсутствие циклов и несвязных частей) в процентном отношении. Оптимальность графа по данному по-

казателю $str \to 100\,\%$

$$str = \begin{cases} (|k-1-m|*100)/(k-1), & \textit{если } |k-1-m| < k, \\ 0, & \textit{в остальных случаях}, \end{cases}$$

где m – число дуг графа.

• *Последовательность изложения* представляет собой путь на графе понятия, включающий по возможности все вершины графа. Правильная последовательность изложения проявляется в отсутствии объяснений неизученных понятий неизученными. То есть отсутствие неразрешимых петель на графе, когда для понимания одного нового понятия требуется изучить второе понятие. При этом для понимания второго понятия требуется знание и понимание первого. Идеальная последовательность, это когда все понятия множества $A_A(x)$ объяснены, но ни одно из понятий не объяснялось два и более раз (т. е. простой путь). Обычно в излагаемом преподавателем материале петель бывает немного, поэтому в качестве единицы измерения этого параметра предлагается использовать количество петель. Оптимизация графа будет заключаться в исключении петель из последовательности изложения $loop \to 0$. Однако количество вершин (понятий) k' множества понятий $A'_A(x)$, входящих в путь (последовательность изложения) может не совпадать с количеством понятий множества $A_A(x)$ $k' \neq k$. Этому может быть несколько причин. Первая – анализ знаний обучающихся (например, входной тест) показал, что часть понятий уже знакома обучающимся и дополнительное повторение не требуется. Вторая – это наличие петель в последовательности изложения. Третья – комбинация первой и второй. Предлагается следующий способ вычисления количества петель:

$$loop = k - k'',$$

где k''– количество понятий множества понятий $A''_A(x)$, являющегося пересечением множеств $A_A(x)$ и $A'_A(x)$, $A''_A(x) = A_A(x) \cap A'_A(x)$, $A''_A(x) \subseteq A_A(x)$, $k'' \le k$.

Скорость и степень понимания

Частичное понимание начинается уже при $A_B(x) \neq \varnothing$ и $L_B(x) \neq \varnothing$, а при значении $s \ge 1$ из разрозненных элементов образуется система, выражаемая данным понятием. В то же время процессы запоминания и понимания похожи, но не идентичны. Если запоминание может проходить без понимания, то для понимания необходимо держать в памяти каждый из элементов, составляющих понятие. Поэтому на каждый элемент области знаний $B(x)$ о понятии x действуют законы о запоминании и забывании, а степень присутствия элемента в памяти на момент времени t вычисляется как функция принадлежности по формуле, подробно рассмотренной в работах [5–7]:

$$\mu_{\Pi}(x,t) = \begin{cases} \omega_{n+1}(t_F), & \text{если } t = t_F; \\ \omega_n(t), & \text{если } t \neq t_F, \end{cases}$$

где t_F – время окончания повторения; $\omega_n(t_F)$ – уровень знаний сразу после n-го повторения; $\omega_n(t)$ вычисляется как

$$\omega_n(t) = \omega_n(t_F) e^{-K(t-t_F)}, \tag{2}$$

где K – коэффициент скорости забывания, вычисляемый по формуле

$$K = \frac{1-\xi(t_F)}{10 \cdot \xi(t_F)} \cdot e^{-n\xi(t_F)}. \tag{3}$$

Коэффициент K зависит экспоненциально от количества повторений, а также от величины суммарного коэффициента ξ на момент n-го повторения, который вычисляется по формуле:

$$\xi(t) = \begin{cases} \xi(t_F), & \textit{если } \xi(t_F) > 0, \\ 0, & \textit{если } n = 0, \\ 1 - \dfrac{1-\omega_{n+1}(t_F)}{1-\omega_n(t)}, & n = n-1, \textit{ если } \xi(t_F) = 0. \end{cases} \tag{4}$$

А $\omega_{n+1}(t_F)$ с учетом процесса забывания, функция, отражающая уровень знаний в момент окончания n+1 повторения, будет принимать вид следующего рекуррентного уравнения:

$$\omega_{n+1}(t_F) = 1 - (1 - \omega_n(t))(1 - \xi(t)) - \\ - (\omega_n(t_F) - \omega_n(t)),\ \omega_1 = 0. \tag{5}$$

Таким образом, образуется массив, каждый элемент которого имеет разную степень присутствия в памяти:

$Z(x, t) = \{\mu_1(a_1, t), \mu_2(a_2, t), ..., \mu_r(a_r, t)\}$,

где $\mu_1(a_1, t)$, – степень присутствия в памяти элемента a_1 на момент времени t; r – коэффициент общей трудоемкости.

Аналогично формируется массив понятых элементов $Z'(x, t) = \{\mu'_1(a_1, t), \mu'_2(a_2, t), ..., \mu'_r(a_r, t)\}$, где степень понимания $\mu'_1(a_1, t)$ элемента a_1 на момент времени t вычисляется так же, как функция принадлежности по формулам (2–5). Но т. к. скорость забывания информации может существенно отличаться от скорости потери понимания, коэффициент ξ, отражающий скорости потери понимания для формулы (3) будет вычисляться как

$$\xi(t_F) = \frac{qa}{r} + b,$$

где q – количество понятых элементов понятия x на момент времени t_F (окончания очередного шага изучения); r – коэффициент общей трудоемкости; a, b – коэффициенты (экспериментальные данные говорят о том, что в большинстве случаев значения этих коэффициентов можно принять за $a \approx 0{,}49$, $b \approx 0{,}5$).

Разница между скоростью понимания и запоминания информации, а также между скоростью забывания информации и связанной с ней потерей понимания, хорошо видна на графике при попарном сравнении элементов массивов $Z(x,t)$ и $Z'(x,t)$. Обычно при большом количестве элементов кривые Z и Z' имеют значительные различия. Тем не менее, в качестве интегральной оценки *степени понимания* понятия x на момент времени t предлагается принять усредненное значение массива $Z'(x,t)$:

$$\mu'(x,t) = \left(\sum_{i=1}^{r} \mu'_i(a_i,t) \right) \Big/ r .$$

Ориентировочное *количество шагов*, необходимых для полного понимания данного понятия рассчитывается как

$$n(x) = \sum_{\substack{i=n_\partial, \\ k=q_\partial, \\ g=k/i}}^{(k=k+g)<r} i+1,$$

где n_m – количество уже проделанных шагов; q_m – количество уже понятых элементов из понятия x.

В то же время лишь часть элементов области знаний $A(x)$ о понятии x относится к структурно-смысловой составляющей этого понятия. Остальные элементы носят характер дополнительной и фактической информации. Именно восприятие смысловой основы понятия является тем, что обычно подразумевается под *процессом понимания*. Поэтому количество шагов и степень понимания смысловой основы понятия рассчитываются, соответственно, на подмножество элементов $\mu'(x',t)$ и $n(x')$, где $x' \subset x$ – подмножество элементов из множества $A_A(x)$, образующих структурную основу понятия, и связанные с ними элементы множеств $L_A(x)$, $V_A(x)$, $R_A(x)$.

Управление информацией с использованием разработанной модели

На основании разработанных моделей процессов понимания и усвоения информации предлагается модель управления, реализующая многоканальное, многорежимное управление этими процессами. Новыми элементами данной модели являются расширенные функции самоуправления и соуправления, а также приспособление к уровню понимания УМ в подсистеме адаптации (формирование индивидуального графика повторений понятий УМ). Функцией управления в этой системе является вектор из четырех контуров управления: $u_S(t)$ – контур обучающегося (студента), $u_T(t)$ – контур преподавателя, $u_O(t)$ – контур влияния внешней среды и $u_A(t)$ – контур автоматизированной обучающей системы (АОС). Каждый из контуров также представляет собой вектор управления. Цель управления – максимизация выходного параметра $y(x)$:

$$u(t) = \begin{Bmatrix} u_S(t) \\ u_T(t) \\ u_O(t) \\ u_A(t) \end{Bmatrix} \to \max_{y(x)} . \qquad (6)$$

Входная информация x представляет собой вектор, состоящий из k смысловых единиц информации $x = \{x_i\}$, $i = 1, \ldots, k$. Под смысловой единицей информации понимается сложное или простое понятие, а также конкретные формулы, теоремы, определения, аксиомы, леммы, следствия, законы, правила, события и факты, рассматриваемые в контексте УМ. y – это вектор $\{y_j\}$ результатов измерений уровня знания или понимания смысловых единиц информации x_i, где каждому x_i может соответствовать ноль или более результатов измерений y_j. Для измерения в процессе прохождения многошагового обучающего диалога усвоенной информации используется многобалльная целочисленная или вещественная шкала.

Функция понимания и усвоения информации обучающимся в этой системе будет:

$$\mu(x, t) = f(u(t), u''_0(t), Par(x, t), \xi_\Sigma(t), Par(y, t), n, ...),$$

где $u(x,t)$ – управляющее воздействие АОС в момент времени t, вычисляемое по формуле (6); $u''_0(t)$ – воздействие внешней среды; $Par(x,t)$ – параметры входной информации; $\xi_\Sigma(t)$ – совокупность внешних и внутренних факторов, влияющих на обучающегося в процессе восприятия им входной информации; $Par(y,t)$ – параметры способа контроля уровня знаний обучающегося; n – количество повторений УМ на момент времени t.

В случае структурирования обучающей информации с помощью графов понятий могут быть использованы все вышеописанные способы из-

мерения таких параметров, как язык изложения, связность, структурированность, последовательность изложения. Функция управления обучающей информацией представляется как система оптимизации параметров этой информации:

$$u(x,t)=\left\{\begin{array}{l} k\to 0 \\ j\to 0 \\ s\to \max \\ str\to 100\,\% \\ loop\to 0 \end{array}\right\}\to \max_{\mu(x,t)}.$$

Смысловое содержание учебного материала представляет собой целостное единство теоретической и фактической информации, а понимание отдельных слов непосредственно связано с правильным пониманием смысла учебного материала. Ряд проблем управления процессом понимания информации у обучающихся обусловлен, прежде всего, несовпадением языков взаимодействия АОС или преподавателя с обучающимся. Поэтому один из ключевых моментов повышения качества обучения – анализ содержания информации и ее реструктурирование.

Введение дополнительных измеряемых параметров в случае использования графов понятий даст возможность более точно определять характеристики обучающей информации и, тем самым, более эффективно управлять процессом понимания. Кроме того, механизм управления, включающий контуры соуправления преподавателя, обучающегося и внешней среды, по сравнению с простым автоматизированным управлением, позволяет приблизить параметры функции управления АОС к параметрам внутренней функции переработки и усвоения информации обучающимся за счет неформального увеличения количества наблюдаемых параметров объекта управления и более гибкой адаптации к его социальной природе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мышкис, А.Д.** Элементы теории математических моделей [Текст]/А.Д. Мышкис; 3-е изд., испр. –М.: КомКнига, 2007.–192 с.

2. **Солсо, Р.** Когнитивная психология [Текст]/Р. Солсо; 6-е изд.–СПб.: Питер, 2006.–589 с.

3. **Неволин, И.Ф.** Процессы понимания и когнитивной самооценки в тестовых технологиях [Электронный ресурс]/И.Ф. Неволин, М.Б. Позина//www.nesterova.ru/nauch/testing.pdf.

4. **Александров, И.О.** Формирование структуры индивидуального знания [Текст]/И.О. Александров. –М.: Изд-во Ин-ут психологии РАН, 2006.–560 с.

5. **Тазетдинов, А.Д.** Анализ математических моделей обучения в приложении к компьютерным обучающим системам репетиторского типа [Текст]/А.Д. Тазетдинов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2008.–№ 3(60).–С. 191–196.

6. **Тазетдинов, А. Д.** Математическая модель усвоения знаний для компьютерных систем репетиторского типа [Текст]/А.Д. Тазетдинов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2008.–№ 4(62).–С. 134–140.

7. **Тазетдинов, А. Д.** Об использовании графов понятий для структурирования и управления информацией в автоматизированных обучающих системах [Текст]/А.Д. Тазетдинов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 5(86).–С. 7–12.

УДК 519.816

И.А. Шмарин

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ РАЗВИТИЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В начале XXI в. во всем мире стали заметны признаки нестабильности в экономических, социальных и экологических системах. Население Земли неуклонно растет и по некоторым оценкам к 2025 г. достигнет 8 млрд человек (в 2000 г. − 6 млрд человек). Чрезмерное общественное потребление в одних странах и ужасающая бедность в других оказывают огромное дав-

ление на окружающую среду. Во многих регионах планеты состояние окружающей среды в течение последних нескольких десятилетий сильно ухудшилось и достигло критического уровня.

Эти тенденции наводят на мысль о том, что текущее развитие человечества характеризуется высокой неустойчивостью. Экономическое развитие, игнорирующее тревожные сигналы со стороны эко- и социальных систем, может привести к нежелательным последствиям: изменению климата, истощению источников пресной воды, потере биологического разнообразия.

Очевидно, что гармонизация условий экономического, социального и экологического развития не может быть достигнута сама по себе. Концепция устойчивого развития, подразумевающая оптимальное использование ограниченных ресурсов и утилизацию отходов, а также природо- и ресурсосберегающих технологий, явилась итогом экологизации научных знаний. Ее реализация предполагает удовлетворение нынешних потребностей без подрыва возможности будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности. Можно выделить две основные точки зрения относительно способов достижения устойчивого развития. Наибольшее число специалистов разделяют мнение о необходимости глобальной индустриализации. Они полагают, что общий рынок и свободный доступ к ресурсам станут базой для социальных изменений. Другая группа ученых выступает против как вариантов современной экономической системы (на основе рынка и плана), так и неравномерного развития мировой экономики. Им видится будущее, основанное на коллективном труде в рамках автономных коммун и справедливом обмене товарами.

Обе эти группы специалистов признают главенствующую роль технологий в достижении устойчивого развития. Вне техносферы, служащей своеобразной прослойкой между человеком и окружающей средой, дальнейшая эволюция общества невозможна.

Глобализация мировой экономики привела к тому, что высокий уровень потребления внутри одной страны может воздействовать на жителей и экосистемы государств, находящихся на другой стороне земного шара. Политической воли со стороны отдельно взятого государства и даже региональных союзов (ЕС, НАФТА, АСЕАН) для достижения гармонии экономического, социального и экологического развития недостаточно. Государства должны действовать сообща с частным сектором, который также должен брать на себя ответственность за здоровье сотрудников и безопасность окружающей среды.

Одно из наиболее перспективных решений, способных обеспечить достижение целей устойчивого развития, – дематериализация. Это достижение имеющихся или улучшенных результатов труда за счет снижения потребления материалов. Ее можно осуществлять путем повышения эффективности производственных процессов, постепенного увеличения доли услуги при одновременном снижении доли продуктов, бережного отношения к окружающей среде, а также изменения потребностей общества.

Информационные технологии (ИТ) – одно из средств, позволяющих заменить выпуск продукции предоставлением услуг. Основой дематериализации продуктов является снижение в них доли материальной составляющей и, соответственно, повышение доли информационной составляющей. Создание эффективной системы, позволяющей проводить мониторинг, анализ и документирование организационных процессов возможно только с помощью информационных технологий.

Основной характеристикой устойчивого развития предприятия выступает размер прибыли, достаточный для самофинансирования и умеренного роста объемов продаж товаров и услуг.

Обеспечение устойчивого развития экономики предприятия основано на принципе социальной ответственности перед обществом. В этом аспекте прибыль не является конечной целью деятельности предприятия, а выступает средством достижения системы социальных, экономических, технических и экологических целей.

Можно выделить следующие условия устойчивого развития предприятия:

выпуск качественной продукции, отвечающей потребностям рынка;

постоянная модернизация производственных мощностей;

создание благоприятного имиджа в глазах потребителей и деловой репутации в глазах партнеров;

поддержание благоприятного социально-психологического климата в коллективе и обеспечение условий для творческой самореализации работников;

выполнение требований экологической безопасности производственного процесса.

С точки зрения бизнеса, выгода от следования этой концепции состоит в увеличении прибыли путем снижения материальных затрат и операционных издержек. Однако в настоящее время развитию новых направлений бизнеса, слияниям и поглощениям, маркетингу все еще уделяется больше внимания, нежели проблемам окружающей среды, здоровья и безопасности человека. Менеджеры компаний, озабоченные решением тактических задач, не понимают выгоды от обеспечения устойчивости развития. К счастью, специалисты, в т. ч. и сотрудники исследовательских центров компаний, все чаще выдвигают идеи, касающиеся использования современных информационных технологий с выгодой как для компании, так и для окружающей среды.

Информационные технологии играют роль проводника на пути компании к достижению устойчивости развития. Очевидным примером являются видеоконференции. Они дают возможность проводить совещания с международными компаниями-контрагентами, не выходя из офиса, сокращая операционные издержки. Хотя выгода от использования таких технологий очевидна, российские компании пока не способны проводить организационные изменения, необходимые для того, чтобы информационные технологии работали на благо повышения эффективности предприятия.

Начало эпохи персонального компьютера совпадает с преобразованием индустриальной экономики в информационную. Она характеризуется так называемым «информациональным способом производства». Его движущая сила и источник добавленной стоимости «заключается в технологии генерирования знаний, обработки информации и символической коммуникации», а также воздействии «знания на само знание». Развитие «информационального общества» основывается на применении нового подхода к оценке места и роли интеллектуальной и духовной сфер человека [2]. При этом определяющими факторами развития становятся информация, привлечение большего внимания к интеллектуальной деятельности вообще и инновационной деятельности в частности.

Совершенствование компьютерных технологий привело к одновременному развитию информационных технологий. В широком смысле к ним относят использование электронных устройств и программного обеспечения для конвертирования, хранения, отправки, получения, отображения, передачи и контроля информации в процессе коммуникации [3].

Следуя принципам устойчивого развития и применяя в своей деятельности ИТ, менеджмент предприятия получает возможность принимать системные управленческие решения за счет расширения возможностей доступа и обработки экономической, экологической и социальной информации и пр. Одним из наиболее эффективных средств анализа информации видится внедрение на предприятии автоматизированной информационной системы контроллинга (АИСК). К ее задачам относятся мониторинг текущего состояния и перспектив развития собственного бизнеса, анализ изменений макроэкономической ситуации и учет неопределенности конкурентной среды. Системная ориентация АИСК предусматривает охват управленческими решениями всех сторон деятельности предприятия. Это возможно только при условии обеспечения доступа к данным, их хранения в унифицированных форматах, применения моделирования, представления информации в форме, удобной для выработки решений. При внедрении АИСК целесообразно ориентироваться на создание единого информационного пространства предприятия путем объединения совместимых функционально специализированных программных продуктов. Цель предприятия в данном аспекте – добиться синергии менеджмента, контроллинга и ИТ.

Развитие сетевых и телекоммуникационных технологий, а также интеграция локальных сетей в глобальную (Интернет) способствует тому, что внутренние «виртуальные пространства» организаций объединяются, образуя единый «виртуальный мир» планетарного масштаба, в котором снижается значимость таких факторов, как время и пространство. ИТ обеспечивают высокую скорость передачи информации. Связь и взаимодействие участников общественных отношений происходит практически мгновенно на любых расстояниях. Отличительной чертой информатизации общества в области финансов является изменение роли денег, которые в большей степени становятся «электронными». Появляется возможность их непосредственного обмена между индивидуумами с использованием электронных кошельков.

Совокупность обозначенных тенденций свидетельствует о формировании новой экономики.

Ее особенность – «неубывание информации как товара при ее обмене между участниками рынка» [1]. Это позволяет говорить о потенциальной возможности стабильного экономического роста. В таких условиях возникают две приоритетные задачи стратегического управления предприятием. Первая задача – создание механизмов реализации прав и обязанностей участников рынка информационных товаров и услуг. Вторая заключается в привлечении инвестиций в ИТ-компании, а также в те предприятия, эффективность деятельности которых находится в тесной связи с уровнем используемых ими ИТ.

В последнее время наибольшую популярность приобрело управление инвестициями в технологические компании (не только в отрасли ИТ) через отпочковавшиеся компании – спинауты. Такой вариант венчурного инвестирования дает ряд преимуществ по сравнению с созданием абсолютно новой компании, поглощениями и слияниями. Являясь новым предприятием, спинаут независим в вопросах принятия управленческих решений. В этом случае предприятие остается тесно связанным с создавшей его компанией. Финансовый характер таких связей проявляется во владении акциями и финансовом контроле со стороны материнской компании. Оперативные связи включают предоставление материнской компанией спинауту маркетинговой и управленческой поддержки.

Российский венчурный капитал находится в стадии зарождения. Наши инвесторы редко вкладывают большие средства в несырьевой сектор экономики, а тем более – в предприятия с неясным будущим. Для успешного развития такого капитала в России требуются меры государственной поддержки по оказанию финансовой и информационной помощи малым инновационным предприятиям, а также по созданию и развитию инфраструктуры поддержки малого инновационного предпринимательства.

Решая задачу выживания в условиях финансового кризиса, предприятия снижают в краткосрочной перспективе инвестиционную активность, нарушают обязательства перед партнерами. Это противоречит условиям достижения устойчивого развития.

Однако и поныне существуют эффективные предприятия, для которых интересы всех участников хозяйственной деятельности сбалансированы. Для увеличения количества таких организаций государству следует активнее поддерживать процесс перехода предприятий в желаемое состояние устойчивого развития. Для этого необходимо разработать программы реформирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Биктимиров, М.Р.** Инженерные основы защиты интеллектуальной собственности [Текст]/М.Р. Биктимиров, А.В. Домашев, Е.А. Дуйков [и др.].–Казань: Изд-во КГУ, 2008.

2. **Кастельс, М.** Информационная эпоха: экономика, общество и культура [Текст]/М. Кастельс.–М.: ГУ ВШЭ, 2000.

3. **Ryssel, R.** The impact of information technology deployment on trust, commitment and value creation in business relationships [Текст]/R. Ryssel, T. Ritter, H.G. Gemünden//The of Business & Industrial Marketing. –2004.–Vol. 19.–№ 3.–P. 197–207.

УДК 519.866

П.Н. Победаш

АНАЛИЗ МОДЕЛИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННОГО ПОДХОДА

В условиях экономического кризиса развитие современного промышленного предприятия невозможно без привлечения инвестиций и внедрения инноваций. Инновационный проект, как

правило, характеризуется риском, что объясняется неопределенностью инициируемых этим проектом денежных потоков (ДП), спроса на производимую продукцию, уровня инфляции и других показателей. При этом вероятностный подход не всегда применим, поскольку значения указанных характеристик могут быть неизвестны в силу влияния на них множества факторов различной природы. Поэтому актуален подход, позволяющий оценивать качество реализации инновационных проектов в условиях неопределенности на этапе их предынвестиционного анализа.

В данной статье предлагается приложение операционного подхода, изложенного в работе [1], к анализу эффективности инвестиционных проектов (ИП) инновационного развития предприятия. Покажем его на примере задачи, описанной в [2]. Предприятие имеет начальный капитал и планирует многономенклатурное производство продукции, спрос на которую неизвестен в силу инновационности проекта. При этом заданы стоимость, срок службы, производительность единицы основных производственных фондов (ОПФ) и стоимость единицы выпускаемой продукции каждого вида. Надо найти суммы инвестиций, выделяемые на реализацию ИП в целом и по каждому виду ОПФ отдельно, максимизирующие в смысле Парето в заданный период дисконтированные суммы ДП его участников – предприятия и налогового центра (НЦ).

Пусть выполнены следующие основные предпосылки: 1) учитываются налоги, составляющие большую часть затрат предприятия: налог на добавленную стоимость (НДС), налог на прибыль (НП), налог на имущество (НИ), единый социальный налог (ЕСН) и отчисления в фонд оплаты труда (ФОТ); 2) срок T действия ИП меньше сроков T_k службы единицы ОПФ каждого типа; 3) на ОПФ каждого вида производится лишь один тип продукции. С учетом этих предпосылок сформулированная задача описывается многокритериальной многошаговой задачей линейного программирования (ММЗЛП), которую назовем моделью B1 [2]. Модель B1 с условием $x_k(T) = x_k^T$ ($k = 1, ..., n + 3$), где x_k^T – заданное конечное состояние экономической системы «предприятие – НЦ», назовем моделью B1'. Не нарушая общности, можем полагать $x_k(T) = 0$ ($k = 1, ..., n + 3$).

Отметим, что модель B1 получается из модели A, описанной в статье [1], исключением неравенства $u_{n+k} \le q_k(t+1)$ ($k = 1, ..., n$; $t = T^2, ..., T-1$) в силу условий $q_k(t+1) \to +\infty$ ($k = 1, ..., n$; $t = T^2, ..., T-1$); $T^1 = T^2 = 1$, где $q_k(t+1)$ ($t = T^2, ..., T-1$) – прогнозный спрос в стоимостном выражении для момента $t + 1$, а T^1, T^2 – соответственно моменты завершения внешнего инвестирования и начала производства. Поэтому задачу B1 можно трактовать как частный вариант модели A с бесконечным спросом.

Согласно [3], ММЗЛП B1 и B1' равносильны соответствующим однокритериальным задачам с теми же ограничениями и условием:

$$J(\mu) = \mu J_1 + (1-\mu)J_2 \to \max\ (\mu \in (0;1)), \quad (1)$$

где J_1, J_2 – целевые критерии предприятия и НЦ.

Применим к задаче с ограничениями модели B1' и условием (1) оператор, задаваемый формулой $Z_T(x(t)) \overset{def}{=} X(z,T) = \sum_{t=0}^{T-1} x(t) z^{-t}$ ($z \ne 0$), при $z = 1 + r$, где r – ставка дисконтирования. Учитывая свойство $Z_T(x(t+1) = z[X(z, T) + x(T)z^{-T} - x(0)]$, получим статическую задачу линейного программирования (ЗЛП):

$$zX_k = X_k + U_k\ (k = 1, ..., n),$$

$$zX_{n+1} = -\sum_{k=1}^{n} X_k / T_k + X_{n+1} + \sum_{k=1}^{n} U_k,$$

$$zX_{n+2} = \alpha_3 \sum_{k=1}^{n} X_k / T_k - \theta X_{n+1} + X_{n+2} -$$

$$- \sum_{k=1}^{n} U_k + \gamma \sum_{k=1}^{n} U_{n+k} + u_{2n+1}(0) + u_{2n+2}(0), \quad (2)$$

$$zX_{n+3} = X_{n+3} + u_{2n+1}(0);$$

$$zX_{n+2} \ge 0, -\sum_{k=1}^{n} X_k / T_k - \alpha_2 X_{n+1} + (1-\beta)\sum_{k=1}^{n} U_{n+k} \ge 0,$$

$$U_{n+k} \le \delta_k X_k\ (k = 1, ..., n),$$

$$u_{2n+1}(0) \le I_0,\ u_{2n+2}(0) \le K_0;\ U_k \ge 0\ (k = 1, ..., 2n);$$

$$u_{2n+1}(0) \ge 0,\ u_{2n+2}(0) \ge 0;$$

$$\overline{J}'(\mu) = \mu \overline{J}'_1 + (1-\mu)\overline{J}'_2 \to \max\ (\mu \in (0;1)),$$

где $\overline{J}'_1 = -u_{2n+1}(0) - u_{2n+2}(0) + \alpha_3 \sum_{k=1}^{n} X_k / T_k - \theta X_{n+1} +$

$+ \gamma \sum_{k=1}^{n} U_{n+k}$, $\overline{J}'_2 = -\alpha_3 \sum_{k=1}^{n} X_k / T_k + \theta X_{n+1} + \rho \sum_{k=1}^{n} U_{n+k}$,

$u_k(t)$($t = 0, ..., T-1$), $u_{n+k}(t)$($k = 1, ..., n$; $t = 1, ..., T-1$), $u_{2n+1}(0)$ и $u_{2n+2}(0)$ – стоимость приобретаемых ОПФ, выручка от реализации продукции k-го типа, внешние и внутренние инвестиции соответственно; $u_k(t)$, $u_{n+k}(t)$, $u_{n+2}(t)$ и $u_{n+3}(t)$ ($k = 1, ..., n$; $t = 1, ..., T-1$) – соответственно накопленная стоимость всех ОПФ k-го типа, остаточная стоимость

всех ОПФ, текущие денежные средства предприятия и накопленные суммы внешних инвестиций в момент t; V_k, T_k, c_k и P_k – производительность, срок службы, стоимость единицы ОПФ и стоимость единицы продукции k-го типа соответственно ($k = 1, \ldots, n$); I_0, K_0 – суммы внешних и внутренних инвестиций, выделяемых на весь срок действия ИП; α_1, α_2, α_3, α_4 – ставки НДС, НИ, НП и ЕСН соответственно (НДС включается в цену продукции, поэтому можно считать, что $\alpha_1 = 0$); β – доля выручки от реализации, выделяемая на ФОТ; T – срок действия ИП; $\theta = (1 - \alpha_3)\,\alpha_2$, $\delta_k = P_k V_k / c_k (k = 1, \ldots, n)$, $\gamma = (1 - \alpha_3)(1 - \beta)$, $\rho = (1 - \beta) \times \alpha_3 + \alpha_4 \beta$, r – ставка доходности ИП; δ ($0 \le \delta \le 1$) – доля остаточной стоимости всех ОПФ на момент $t = T$ от ее балансовой стоимости, определяемая в общем случае экспертно; $U_j(z,T) = \sum_{t=0}^{T-1} u_j(t) z^{-t}$, $U_{n+j}(z,T) = \sum_{t=0}^{T-1} u_{n+j}(t) z^{-t} (j = 1, \ldots, n)$; $X_k(z,T) = X_k(z,T) = \sum_{t=0}^{T-1} x_k(t) z^{-t} (k = 1, \ldots, n+3)$ – Z_T-изображения соответствующих динамических переменных, z, T, T^1 опущены для краткости. В силу (1) ЗЛП (2) равносильна двухкритериальной задаче с теми же ограничениями и условием $\bar{J} = \{\bar{J}_1, \bar{J}_2\} \to \max$, которую назовем моделью Z_T B1'. ЗЛП, получаемую из задачи B1 с помощью оператора Z_T, обозначим Z_T B1.

Отметим, что задачу (2) формально можно получить из модели Z_T **A' (построенной в результате** применения к задаче A' того же оператора) [1], исключив агрегированное неравенство, содержащее спрос.

Выражая переменные $X_k (k = 1, \ldots, n+3)$ из равенств (2), получим ЗЛП:

$$U_{n+k} \le \delta_k X_k \ (k = 1, \ldots, n), \ -\sum_{k=1}^{n} \bar{\alpha}_k U_k - r[\gamma \sum_{k=1}^{n} U_{n+k} + u_{2n+1}(0) + u_{2n+2}(0)] \le 0,$$

$$\sum_{k=1}^{n} \bar{\beta}_k U_k - \gamma r \sum_{k=1}^{n} U_{n+k} \le 0, u_{2n+1}(0) \le I_0, \quad (3)$$

$$u_{2n+2}(0) \le K_0; \ U_k \ge 0 \ (k = 1, \ldots, 2n); \ u_{2n+1}(0) \ge 0;$$

$$u_{2n+2}(0) \ge 0, \ \bar{J}'(\mu) = [\mu\gamma + (1-\mu)\rho] \sum_{k=1}^{n} U_{n+k} - \frac{(1-2\mu)}{r^2} \sum_{k=1}^{n} \bar{\gamma}_k U_k - \mu [u_{2n+1}(0) + u_{2n+2}(0)] \to \max,$$

где $\mu \in (0;1)$, $\bar{\alpha}_k = (\alpha_3 r + \theta)/(rT_k) - \theta - r$, $\bar{\beta}_k = \theta + [(1 - \alpha_3) r - \theta]/(rT_k)$, $\gamma_k = [\alpha_3 / T_k - \theta] r + \theta / T_k (k = 1, \ldots, n)$.

Далее обозначим символом * оптимальные значения сверток критериев и переменных. Для задачи (3) справедлива лемма 1.

Лемма 1. В задаче (3) выполняются равенства: $U^*_{n+k} = \delta_k U^*_k / r (k = 1, \ldots, n)$.

С учетом равенств леммы 1 перейдем от задачи (3) к ЗЛП вида:

$$-\sum_{k=1}^{n} [\bar{\alpha}_k + \gamma\delta_k] U_k - r[u_{2n+1}(0) + u_{2n+2}(0)] \le 0,$$

$$\sum_{k=1}^{n} [\bar{\beta}_k - \gamma\delta_k] U_k, \ u_{2n+1}(0) \le I_0,$$

$$u_{2n+2}(0) \le K_0; \ U_k \ge 0 \ (k = 1, \ldots, 2n); \quad (4)$$

$$u_{2n+1}(0) \ge 0; \ \ u_{2n+2}(0) \ge 0;$$

$$\bar{J}'(\mu) = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{n} \bar{\varphi}_k U_k - \mu [u_{2n+1}(0) + u_{2n+2}(0)] \to \max (\mu \in (0;1)),$$

где $\bar{\varphi}_k = [\mu\gamma + (1-\mu)\rho]\delta_k - [1 - 2\mu]\bar{\gamma}_k / r (k = 1, \ldots, n; \mu \in (0;1))$.

Анализируя ЗЛП (4), и, учитывая, что для сверток $J'(\mu)$ $\bar{J}'(\mu)$ в задачах B1' и (2) (или (3)) по построению имеет место неравенство $J'(\mu) \le \bar{J}'(\mu) (\mu \in (0;1))$, получим теоремы.

Теорема 1. Если выполняются условия $\bar{\alpha}_k + \gamma\delta_k < 0 (k = 1, \ldots, n)$, то ЗЛП Z_TB1', и B1' разрешимы на конечном интервале и имеют место оценки:

$$U^*_k \le -\frac{r(I_0 + K_0)}{\bar{\alpha}_k + \gamma\delta_k}, U^*_{n+k} \le -\frac{\delta_k (I_0 + K_0)}{\bar{\alpha}_k + \gamma\delta_k};$$

$$u^*_k(t) \le -\frac{r(I_0 + K_0)(1+r)^t}{\bar{\alpha}_k + \gamma\delta_k} (t = 0, \ldots, T-1), \quad (5)$$

$$u^*_{n+k}(t) \le -\delta_k (I_0 + K_0)(1+r)^t / (\bar{\alpha}_k + \gamma\delta_k) \ (k = 1, \ldots, n; t = 1, \ldots, T-1),$$

$$0 \le J'^*(\mu) \le \bar{J}'^*(\mu) \le -(I_0 + K_0) \sum_{k:\bar{\varphi}_k > 0}^{n} \bar{\varphi}_k / (\bar{\alpha}_k + \gamma\delta_k) (\mu \in (0;1)).$$

Теорема 2. Если имеют место условия

$$\bar{\varphi}_k \le 0 (k = 1, \ldots, n; \mu \in (0;1)), \quad (6)$$

то задачи Z_T **B1' и B1' разрешимы на конечном интервале** времени и для сверток их критериев выполняется равенство: $J'^*(\mu) = \bar{J}'^*(\mu) = 0 (\mu \in (0;1))$.

Теорема 2 означает, что при условиях (6) Парето-множества в критериальном пространстве задач Z_T B1', и B1' состоят из единственной точки (0;0) и инновационный проект неокупаем для его участников.

Найдем условия разрешимости задачи B1 при $T \to +\infty$, когда ряды $X_k(z) \overset{def}{=} \lim_{T \to +\infty} X_k(z,T) = \sum_{t=0}^{\infty} x_k(t) z^{-t} (k = 1, \ldots, n+3)$ сходятся при z > 1 и по необходимому признаку сходимости для лю-

бого, в частности, *нулевого*, конечного состояния в оптимуме $\lim_{T\to+\infty} x_k(t)z^{-t} = 0$ (k = 1, ..., n + 3). Тогда задача Z_TB1' равносильна Z_TB1'. Так как $\overline{\alpha}_k \to -\theta - r$ при $T \to +\infty$, то, анализируя ЗЛП (4), получим теоремы 3 и 4, подобные теоремам 1 и 2 соответственно.

Теорема 3. Если выполняются условия $\delta_k < (\theta + r)/\gamma$ ($k = 1, ..., n$), то ЗЛП ZB1' и B1' разрешимы на бесконечном интервале и справедливы оценки:

$$U_k^* \le r(I_0 + K_0)/(\theta + r - \gamma\delta_k),$$

$$U_{n+k}^* \le \delta_k (I_0 + K_0)/(\theta + r - \gamma\delta_k)\ (k = 1, ..., n),$$

$$0 \le J'^*(\mu, z) \le \overline{J}'^*(\mu, z) \le (I_0 + K_0)\sum_{k:\varphi_k>0}^{n} \varphi_k /(\theta + r - \gamma\delta_k)$$
$$(\mu \in (0;1)),$$

где $\varphi_k = [1 - 2\mu]\theta + [\mu\gamma + (1 - \mu)\rho]\delta_k$ ($k = 1, ..., n$; $\mu \in (0;1)$).

Отметим, что при $T \to +\infty$ оценки на переменные $u_k^*(t)$(t = 0, ..., T – 1), $u_{n+k}^*(t)$(k = 1, ..., n; t = 1, ..., T – 1) в (5) малосодержательны, например, для $t = T - 1$: $\lim_{T\to+\infty} u_k^*(T-1) < +\infty$ ($k = 1, ..., n$), поэтому не приводятся в теореме 3.

Теорема 4. Если справедливы условия

$$\varphi_k \le 0\ (k = 1, ..., n;\ \mu \in (0;1)), \qquad (7)$$

то задачи B1' и ZB1' разрешимы на бесконечном интервале и для оптимальных значений сверток их критериев выполняется равенство: $J'^*(\mu, z) = \underline{J}'^*(\mu, z) = 0$ ($\mu \in (0;1); z > 1$).

Из теоремы 4 следует, что при условиях (7) критериальные Парето-множества ЗЛП ZB1' и B1' содержат единственную точку (0;0), т. е. ИП неокупаем для его участников даже на бесконечном горизонте планирования.

Отметим, что теоремы 3 и 4 при $T \to +\infty$ имеют место и для ЗЛП Z_T B1, поскольку в этом случае указанная задача эквивалентна Z_T B1'.

Рассмотренный операционный подход обобщает для конечного интервала времени методику анализа из работы [4] задач экономической динамики, описываемых в классе ММЗЛП, позволяя получать широкий спектр результатов: доказательство их разрешимости, аналитические оценки переменных и фронта Парето-множеств на конечном и бесконечном интервалах. Это дает возможность лицу, принимающему решение, оценивать эффективность инновационных проектов, описываемых данными задачами, с учетом интересов нескольких участников.

Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (НИР 2.1.1/2710)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Победаш, П.Н.** Анализ модели оптимального управления реальными инвестициями на основе операционного подхода [Текст]/П.Н. Победаш//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление.–2009.–№ 6 (91). –С. 75–81.

2. **Победаш, П.Н.** Анализ двухкритериальной модели оптимального управления реальными инвестициями с неопределенным спросом [Текст]/П.Н. Победаш//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление.–2009. –№ 5 (86).–С. 114–119.

3. **Подиновский, В.В.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач [Текст]/В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. –М.: Наука, 1982. –256 с.

4. **Медведев, А.В.** Применение z-преобразования к исследованию многокритериальных линейных моделей регионального экономического развития [Текст]/ А.В. Медведев. –Красноярск: Изд-во Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та. 2008. –228 с.

УДК 621.39

И.А. Кулешов, А.Г. Фортинский, С.В. Рябченко

К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ СТРУКТУР УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Непрерывное совершенствование форм и методов управления, а также прогресс в сфере средств обработки информации выдвигают на одно из первых мест проблему оптимального синтеза структуры системы управления сложной организационно-технической системой (ОТС). В

качестве ОТС могут выступать разные системы, в т. ч. и система связи. Уточнение функций, точное определение прав и обязанностей, устранение многоступенчатости в управлении, дублирования в работе и информационных потоках позволит обеспечить значительное сокращение количества существующих проблем.

Основные проблемы при разработке структуры системы управления ОТС – определение необходимого числа уровней подчинения и установление между уровнями правильных взаимоотношений. Это связано со следующими задачами: согласованием целей функционирования элементов систем связи различных уровней и оптимальным сочетанием режимов их работы; распределением ответственности между уровнями системы управления; выбором конкретных схем управления; созданием контуров принятия решения; организацией информационных потоков; выбором соответствующих технических средств. Все эти вопросы взаимосвязаны и образуют сложную проблему функционирования системы управления ОТС.

Под структурой системы управления ОТС понимается разбиение ее на органы управления и объекты управления. Такое разбиение может осуществляться по территориальному, функциональному и организационному признакам.

Построение многоуровневых или иерархических систем управления ОТС с гибким управлением особенно остро ставит вопрос о структуре. В частности, число необходимых уровней подчинения (иерархии) непосредственно связано с техническими возможностями переработки информации на каждом уровне. Возможно бесконечное разнообразие конкретных структур системы управления ОТС. Некоторые из них вообще неэффективны, другие подходят для одной ситуации и не подходят для другой. Найти оптимальную структуру системы управления системой связи и степень ее централизации, которые обеспечат ускорение динамических процессов, высокую надежность и экономичность всей системы – важнейшая и непростая задача.

Под структурой системы понимают также организацию системы из отдельных элементов (подсистем) с их взаимосвязями, которые определяются распределением функций и целей, выполняемых системой.

Таким образом, структура – это организация целого из составных частей. Эффективность структуры определяется количеством, значением, формой и содержанием его составных частей, тем местом, которое они занимают в целом и существующими между ними отношениями.

Организационная структура – это форма распределения задач и полномочий на принятие решений между лицами или группами лиц (структурными подразделениями), входящими в систему управления ОТС, учитывающую направленность организации на достижение стоящих перед ней целей.

Структура системы может классифицироваться [1–5 и др.]:

по числу уровней подчинения – *одно- и многоуровневые или иерархические.* Последние в свою очередь различаются по идентичности узлов и могут быть однородными, когда функции и характеристики узлов одного уровня идентичны, и неоднородными;

• по принципам управления и подчиненности – децентрализованные, централизованные.

• по выполняемым системой функциям и целевому назначению – структуры планирования, оперативного управления, информационные и др.

Систему называют *децентрализованной,* если отдельными элементами системы принимаются решения независимо от других элементов и не корректируются системой более высокого уровня.

В *централизованной* системе задания отдельным элементам выдаются единственным элементом более высокого уровня. В *иерархической* системе элемент некоторого уровня иерархии управляет несколькими элементами более низкого уровня, а сам, в свою очередь, управляется элементом более высокого уровня.

По постоянству связей между элементами системы, их функции и числу различают системы с фиксированной (жесткой) и изменяемой (управляемой или переменной) структурами.

Среди систем управления ОТС наибольшее распространение имеют иерархические системы. Наиболее характерными особенностями которых являются: автономность отдельных управляемых подсистем, состоящая в том, что каждая из них осуществляет управление ограниченным числом подсистем; управление подсистемами происходит при неполной информации (подсистеме более высокого уровня могут быть неизвестны цели и ограничения нижестоящих подсистем); информа-

ция при движении вверх по иерархии уплотняется (агрегируется); существуют цели управления для каждой подсистемы и общая цель для всей системы; взаимовлияния подсистем обусловлены общими ограничениями.

Для любой подсистемы в иерархической структуре можно выделить вышестоящие подсистемы, которым она подчиняется, и подчиненные ей более низких уровней. Такое множество подсистем называют *вертикалью.*

Информационные связи между системами различных уровней принято называть *вертикальными,* а между подсистемами одного уровня – *горизонтальными.* Для каждой подсистемы связи со всеми подчиненными подсистемами называют *внутренними,* а остальные – *внешними.*

Структура системы управления в первую очередь определяется материальной природой управляемых объектов, характером происходящих в них процессов, взаимодействиями между объектами, ограничениями на их функционирование и алгоритмами управления.

Структура системы управления ОТС может строиться по функциональному или территориальному принципу. Функциональный принцип позволяет осуществлять единую техническую и экономическую политику и должен применяться там, где идет речь о сложных специфических видах ОТС, проектирования и строительства, о развитии научных исследований и их внедрении в производство. Территориальный принцип преобладает, когда ставится задача комплексного использования различных средств и комплексов связи в данном регионе. Он более экономичен, позволяет создавать массовую разработку и производства, не требует проведения отдельных исследований.

В организационных системах управления выделяют типовые структуры: линейную, функциональную, линейно-штабную, матричную.

Линейная структура управления обеспечивает сочетание прямого воздействия на элементы системы связи и сосредоточение в одних руках всех функций управления. Положительные стороны линейного управления – невозможность получения подчиненными противоречивых и неувязанных между собой заданий и распоряжений, полная ответственность руководителя за результаты работы, осуществление принципа единоначалия. Недостатком такой структуры является то, что каждый руководитель должен обладать разносторонними знаниями в объеме, необходимом для руководства специализированными элементами, что затруднительно при современном сложном и многостороннем управлении.

Функциональная структура управления предусматривает создание в пределах определенных функций специализированных ячеек управления, которые направляют нижестоящим подсистемам обязательные для них решения.

Функциональная структура управления позволяет привлечь к руководству отдельными специальными функциями более компетентных специалистов, разгрузить руководителей системы, в целом упростить их работу. Однако функциональная система управления нарушает принцип единоначалия, т. к. исполнитель получает указания от нескольких начальников (специалистов). Наряду с «линейной иерархией» формируется «функциональная иерархия», решения которой передаются по ее ступеням.

В процессе развития линейная структура управления все более органически сочеталась с функциональной структурой, в результате чего возникла *линейно-штабная* структура управления, при которой у руководителя-единоначальника появляется «штаб», состоящий из функциональных ячеек (управлений, отделов, групп, отдельных специалистов), выполняющих определенные функции управления.

Под *матричной* структурой управления понимают дополнение линейно-функциональной структуры управлением по отдельным целям и задачам функционирования. Ответственность за выполнение определенных работ и соответствующие права распределены в этом случае не так четко, как при традиционных линейной и функциональной структурах. Повышается роль «горизонтальных» информационных потоков. Руководители системой обычно определяют, что и когда должно быть сделано, а руководители подсистем – каким образом должна быть выполнена эта работа.

В настоящее время не существует достаточно простых количественных методов анализа и синтеза структуры системы управления ОТС. Действующие системы управления сформировали свою структуру в результате длительного процесса адаптации.

Несмотря на достаточно строгое распределение функций между подсистемами различных уровней, часто в подсистемах более высокого уровня происходит решение тех задач, которые

могли бы решаться на более низком уровне, что уменьшает эффективность системы управления в целом.

В системах управления с нерационально распределенными функциями наблюдается увеличение плотности информационных потоков и рост объема неиспользуемой информации, особенно на верхних уровнях управления.

Нерациональное распределение функций между подсистемами и звеньями различного уровня в существующих системах управления в ряде случаев не является очевидным и может быть выявлено только в результате тщательного анализа этих систем.

Для оценки структуры системы управления ОТС, что связано со сложными взаимоотношениями человек-машина, в настоящее время разработано значительное количество методик. Однако во многих из них большое число допущений и ограничений, что снижает их ценность. В связи с этим авторами статьи предлагается в следующих выпусках журнала развить идею оценки системы управления и представить на суд читателей их взгляды на эту проблему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макаров, И.М.** Теория выбора и принятия решений: Учеб. пособ. [Текст]/И.М. Макаров, Т.М. Виноградская [и др.].–М.: Наука, 1982.–328 с.

2. Теория прогнозирования и принятия решений: Учеб. пособ. [Текст]/Под общ.ред. С.А. Саркисяна.–М.: Высш. шк., 1997.–351 с.

3. **Штойер, Р.** Организационные структуры управления [Текст]/Р. Штойер. –М.: Радио и связь, 1992. –324 с.

4. **Мушик, Э.** Методы принятия технических решений [Текст]/Э. Мушик, П. Мюллер; Пер. с нем. –М.: Мир, 2000.–208 с.

5. **Блекуэл, Д.** Теория игр и статистических решений [Текст]/Д. Блекуэл, М. Гиршик. –М.: Наука, 1972.–327 с.

6. **Юдин, Д.В.** Вычислительные методы теории принятия решений [Текст]/Д.В. Юдин. –М.: Наука, 1999.–224 с.

7. **Шишкин, И.Ф.** Квалиметрия и управление качеством: Учебник для вузов [Текст]/И.Ф. Шишкин, В.М. Станякин.–М.: Изд-во ВЗПИ, 2002.–254 с.

8. **Anderson, N.H.** Foundations of information integration theory. [Текст]/N.H. Anderson.–NY: Academic Press, 1981.–P. 112–118.

9. **Реклейтис, Г.** Оптимизация в технике: Кн.1 [Текст]/Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К Рэгсдел; Пер. с англ. –М.: Мир, 1986.–349 с.

УДК 681.3 (075.8)

Н.В. Ростов

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ МОДАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ПРЯМОГО И КОСВЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В системах автоматического управления (САУ) с цифровыми модальными регуляторами (МР) и наблюдателями состояния объекта управления (ОУ) закон управления выглядит следующим образом:

$$u[n] = K_g g[n] - K^{\mathrm{T}} X_{\mathrm{o}}[n],$$

где $g[n]$, $u[n]$ – дискретные входное и управляющее воздействия; K^{T} – m-вектор-строка параметров МР; K_g – коэффициент передачи по входу; $X_{\mathrm{o}}[n]$ – m-вектор состояния наблюдателя. Расчет параметров МР обычно проводят алгебраическими методами, основанными на желаемом размещении полюсов замкнутой САУ, либо на минимизации квадратичного интегрального критерия с заданными весовыми матрицами и решении соответствующего уравнения Риккати [1, 3, 9]. Компьютерные технологии параметрического синтеза аналоговых и цифровых МР по каноническим векторно-матричным моделям ОУ методом размещения полюсов, а также по формулам Аккермана и уравнениям Риккати с использованием неканонических моделей описаны в [2, 6].

Однако при неудачном размещении полюсов или задании весовых матриц синтезированная САУ может иметь неоптимальные показатели качества переходного процесса. Кроме того, на практике параметры регулятора, как правило, требуют оптимизации с учетом нелинейностей в ОУ и ограничения по уровню выхода регулятора $|u[n]| \le U_{\max}$. В [5] изложена методика однокритериальной параметрической оптимизации МР, совмещенной с алгебраическим синтезом и проводимой в пространстве полюсов или элементов весовых матриц на основе итерационной минимизации интегрального критерия простого вида, оценивающего динамику САУ по ее нелинейной модели. Но такая оптимизация также сопряжена с субъективностью задания весовых коэффициентов для минимизируемого критерия и поэтому не гарантирует настройки параметров регулятора, наилучшей с технической точки зрения.

Наиболее корректным подходом к параметрической оптимизации САУ является многокритериальный подход, базирующийся на многовариантном выборе решений из области Парето-оптимальных значений [4, 8]. Выбираемым при этом настройкам регулятора соответствуют предельно достижимые динамические возможности оптимизируемой САУ. Традиционно поиск таких настроек проводят методами свертки векторного критерия, либо путем прямого зондирования на сетке значений в многомерном пространстве параметров регулятора, что требует значительных затрат машинного времени из-за большого числа циклов моделирования динамики САУ. Ниже предлагается методика МК-оптимизации цифровых МР на основе прямого и косвенного зондирования, проводимого на сетке параметров алгебраического метода синтеза, эффективность применения которой повышается за счет анализа устойчивости замкнутой САУ в узлах сетки и исключения циклов моделирования в неустойчивых узлах.

Постановка задачи МК-оптимизации

Рассматривается задача минимизации L-вектора частных критериев

$$F(X) = [f_1(X), ..., f_L(X)]^{\mathrm{T}}$$
$$f_j(X) \to \min_{X \in D^m}, \; j = \overline{1, L}.$$

где X – m-вектор оптимизируемых параметров; $D^m : \{f_j(X) \le f_j^o$ – область их допустимых значений, задаваемая критериальными ограничениями и условиями устойчивости САУ. Область Парето-оптимальных значений параметров определяется по результатам отображения области D^m на пространство частных критериев. Оптимизируемыми параметрами МР являются элементы вектор-строки K^{T}, а также вычисляемый параметр $K_g = 1/K_{\mathrm{sys}}$ где $K_{\mathrm{sys}} = C_d^{\mathrm{T}}(E - A_d + B_d K^{\mathrm{T}})^{-1} B_d$ – коэффициент передачи замкнутой дискретной САУ.

Конкретная постановка задачи МК-оптимизации зависит от выбора частных критериев, а эффективность ее решения – от используемого способа зондирования.

Например, векторный критерий может быть задан совокупностью интегральных оценок простого вида, вычисляемых при любом характере переходного процесса в САУ:

$$F(X) = [\,(1/\mathrm{N})\sum_{n=0}^{N} e^2[n],\; (1/\mathrm{N})\sum_{n=0}^{N} (\nabla y| \times \times [n]/T_0)^2,\; (1/\mathrm{N})\sum_{n=0}^{N} u^2[n]\,], \quad (1)$$

где $e[n] = g[n] - y[n]$ – ошибка системы; $\nabla y[n] = y[n] - y[n-1]$ – конечная разность выходной координаты; T_0 – период дискретности. Первый частный критерий характеризует динамику процесса в целом, второй косвенно оценивает степень его колебательности, а третий определяет затраты на управление.

Можно использовать векторный критерий непосредственно из оценок прямых показателей качества САУ, таких, как время первого согласования t_1, время переходного процесса t_{Π} и перерегулирование σ:

$$F(X) = [t_1(X), t_{\Pi}(X), \sigma(X)]^{\mathrm{T}}, \quad (2)$$

но эти показатели не всегда могут быть определены по результатам моделирования САУ.

Можно также комбинировать в векторном критерии прямые показатели качества с интегральными оценками, например, следующим образом:

$$F(X) = [\,t_{\Pi}(X),\; \sigma(X),\; (1/\mathrm{N})\sum_{n=0}^{N} u^2[n]\,]^{\mathrm{T}}. \quad (3)$$

Зондирование многомерного пространства параметров может осуществляться на сетках различных типов: кубической, случайной, равномерной, а также комбинированных. Недостаток кубической сетки – затенение пробными точками друг друга (совпадение их проекций), что уменьшает общее число вариаций значений параметров. На

случайной сетке в получаемых отображениях могут появляться большие зоны, в которые не попали пробные точки. Равномерная сетка лишена недостатков кубической и случайной сеток, но имеет более сложный алгоритм расчета узлов [7].

На практике Парето-множество значений параметров регулятора определяют по оценкам частных критериев в узлах заданной сетки путем многократного моделирования динамики САУ. При этом моделирование необходимо проводить с учетом ограничения выхода регулятора, иначе оптимизация может терять практический смысл.

МК-оптимизация на основе прямого зондирования

Прямое зондирование проводится на сетке значений элементов K_i в m-мерной области, заданной их ограничениями:

$$D^m = \{K_{i\min} \le K_i \le K_{i\max}, i = \overline{1,m}\}.$$

При числе параметров $m \ge 3$ такое зондирование сопряжено с большими затратами машинного времени на моделирование. Например, если шаг сетки каждого из параметров составляет 5 % диапазона его изменения, то общее количество узлов сетки будет равно 20^m. Следовательно, для трех параметров потребуется 8 тыс. циклов моделирования.

Так как прямое зондирование не гарантирует устойчивость САУ во всех узлах, то для снижения

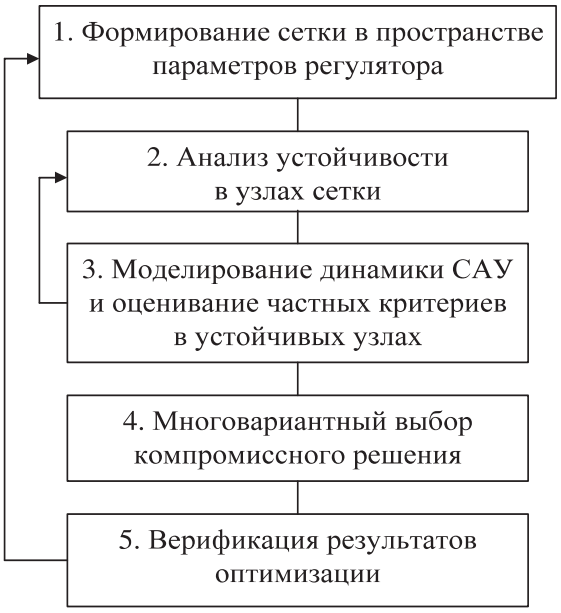


Рис. 1. Схема МК-оптимизации на основе прямого зондирования

затрат машинного времени целесообразно предварительно анализировать в каждом узле устойчивость САУ и проводить затем моделирование ее динамики только в узлах с заданным запасом устойчивости (рис. 1).

Наиболее эффективным с алгоритмической точки зрения является критерий устойчивости, вычисляющий норму переходной матрицы САУ. Для устойчивости цифровой системы требуется, чтобы

$$\|A^{N_{\text{end}}}\| \le \varepsilon < 1, \qquad (4)$$

где $A = (E - A_d + B_d K^{\mathrm{T}})$ – матрица замкнутой дискретной САУ; $N_{\text{end}} = T_{\text{end}}/T_0$ – число тактов (периодов дискретности T_0) переходного процесса; ε – параметр, задающий запас устойчивости. Вычисление переходной матрицы в критерии (4) целесообразно производить по рекуррентному алгоритму ее быстрого возведения в степень:

$$A^{2k} = A^{2k-1} \cdot A^{2k-1},$$

где $k = 1, ..., N$; N = round(ln(Tend/To)); $N_{\text{end}} = 2^N$. При асимптотической устойчивости САУ норма переходной матрицы стремится к нулю, а на границе устойчивости ее значения колеблются в диапазоне [1 ÷ 2].

В качестве окончательного Парето-оптимального решения выбирается компромиссный вариант, в наибольшей степени удовлетворяющий требованиям технического задания и предпочтениям проектировщика. При отсутствии такого решения осуществляется возврат к предшествующим процедурам для изменения области зондирования, типа сетки, увеличения количества узлов или ослабления критериальных ограничений.

МК-оптимизация на основе косвенного зондирования

При косвенном зондировании (рис. 2) параметрами сетки являются вещественные и мнимые части полюсов, размещаемых в узлах, либо, при синтезе на основе решения уравнения Риккати, элементы весовой матрицы Q и весовой коэффициент r квадратичного интегрального критерия:

$$J = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left(X^{\mathrm{T}}[n]QX[n] + ru^2[n]\right), \qquad (5)$$

где $X[n]$ – вектор состояния ОУ.

В первом случае задаваемые в узлах сетки полюса должны быть на комплексной плоскости внутри круга единичного радиуса, а во втором –

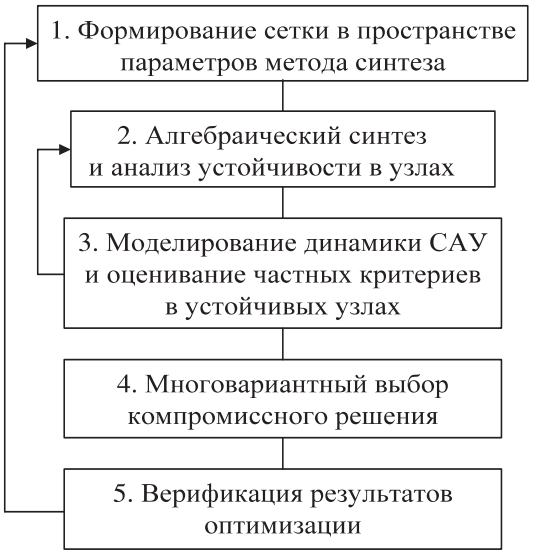


Рис. 2. Схема МК-оптимизации на основе косвенного зондирования

должна обеспечиваться выпуклость квадратичного критерия. В обоих случаях алгебраического синтеза целесообразно анализировать устойчивость замкнутой САУ в узлах по критерию нормы переходной матрицы.

Примеры МК-оптимизации

Осуществим поиск Парето-оптимальных настроек параметров МР для системы с ОУ 3-го порядка, имеющего передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1)},$$

где $K = 10$; $T_1 = 0{,}005$ с; $T = 0{,}05$ с; $\xi = 0{,}5$. Период дискретности примем равным $T_1 = 0{,}005$ с, а ограничение выхода регулятора $U_{max} = 10$.

Пример 1. Проведем прямое зондирование параметров МР, используя векторный критерий (1) и применяя комбинацию кубической и случайной сеток с общим числом узлов, равным 432. Зададим также параметр $\varepsilon = 10^{-5}$, определяющий запас устойчивости в критерии (4).

На рис. 3 представлены результаты моделирования с оценками частных критериев в 67 узлах, устойчивых с заданным запасом. Тремя разными маркерами отмечены Парето-оптимальные варианты решений с минимальными значениями частных критериев (по отдельности). Этим вариантам на рис. 4 соответствуют полученные по дискретно-непрерывной модели САУ с МР и наблюдателем кривые управляющих воздействий и

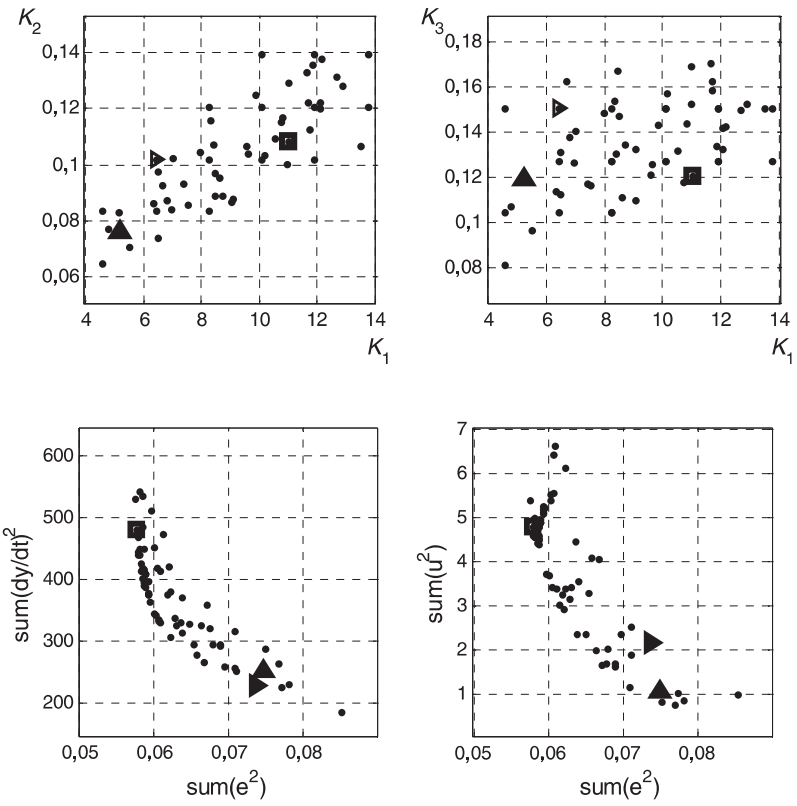


Рис. 3. Результаты прямого зондирования

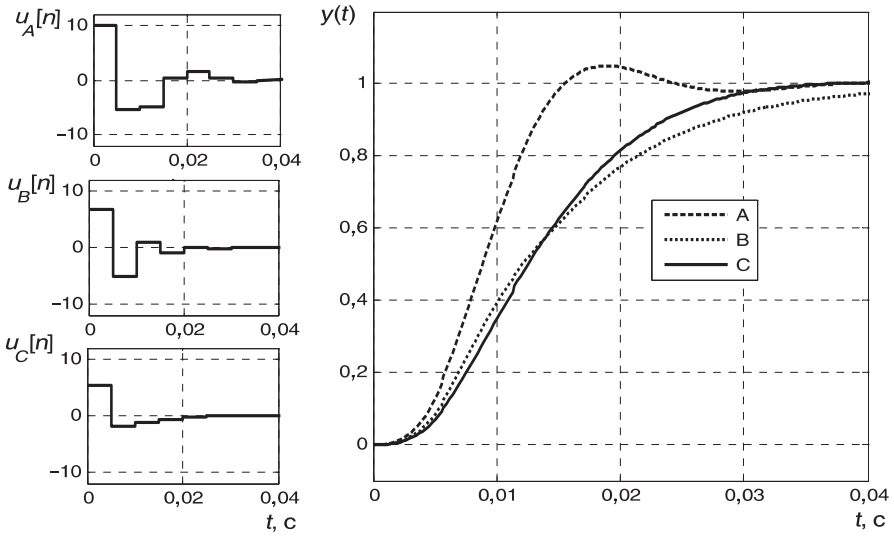


Рис. 4. Парето-оптимальные переходные процессы

переходных характеристик, обозначенные буквами A, B и C.

Пример 2. Выбрав векторный критерий вида (2), проведем косвенное зондирование параметров МР на сетке трех полюсов замкнутой системы

$$\{\mathrm{Re}\gamma_1,\ \mathrm{Re}\gamma_2 + j\mathrm{Im}\lambda_3,\ \mathrm{Re}\gamma_2 - j\mathrm{Im}\gamma_3\}$$

внутри круга единичного радиуса.

Результаты косвенного зондирования представлены на рис. 5, где трем выбранным вариантам размещения полюсов, отмеченным разными маркерами, соответствуют кривые управляющих воздействий и переходных характеристик, обозначенные на рис. 6 буквами A, B и C.

Для выбранных вариантов размещения полюсов получили следующие Парето-оптимальные

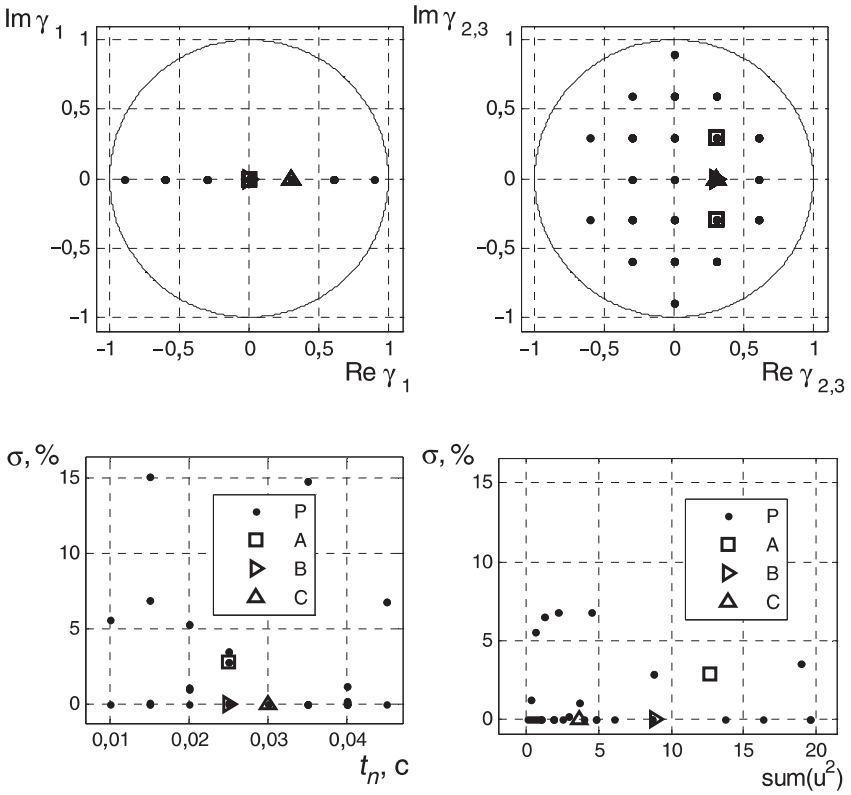


Рис. 5. Результаты зондирования в пространстве полюсов

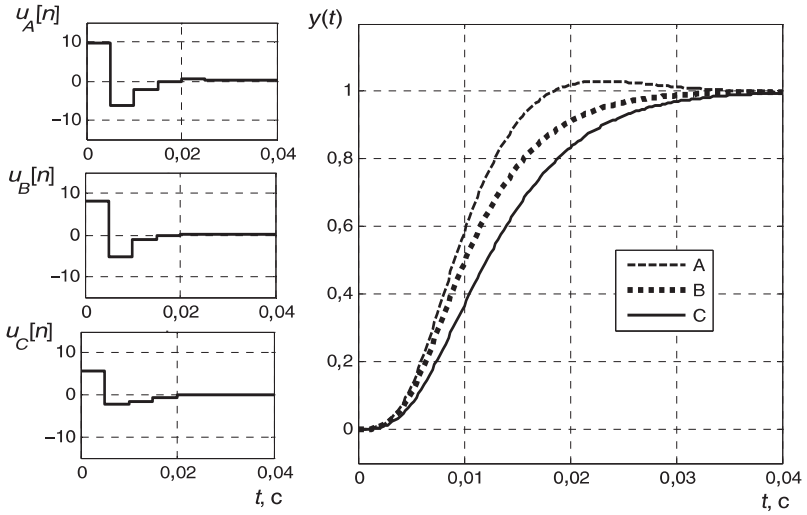


Рис. 6. Парето-оптимальные переходные процессы

значения параметров МР:

$K_A^T = [9{,}42 \quad 0{,}099 \quad 0{,}132]$; $K_{g,A} = 9{,}65$;
$K_B^T = [7{,}918 \quad 0{,}100 \quad 0{,}134]$; $K_{g,B} = 8{,}15$;
$K_C^T = [5{,}492 \quad 0{,}0797 \quad 0{,}115]$; $K_{g,C} = 5{,}707$.

Пример 3. Проведем косвенное зондирование на сетке коэффициента r и диагональных элементов весовой матрицы квадратичного интегрального критерия (5)

$$Q = diag(1, Q_{22}, Q_{33})$$

с алгебраическим синтезом МР в узлах на основе решения уравнения Риккати и оцениванием частных критериев по нелинейной модели САУ.

Выбранным вариантам значений весов (рис. 7) соответствуют решения уравнения Риккати, обеспечивающие Парето-оптимальные переходные процессы, представленные на рис. 8.

Таким образом, показано, что многокритериальную оптимизацию цифровых МР эффективнее проводить, осуществляя косвенное зондирование в пространстве полюсов или весовых коэффициентов с совмещенным алгебраическим синтезом в узлах. По сравнению с прямым зондированием зондирование на сетке параметров метода синтеза

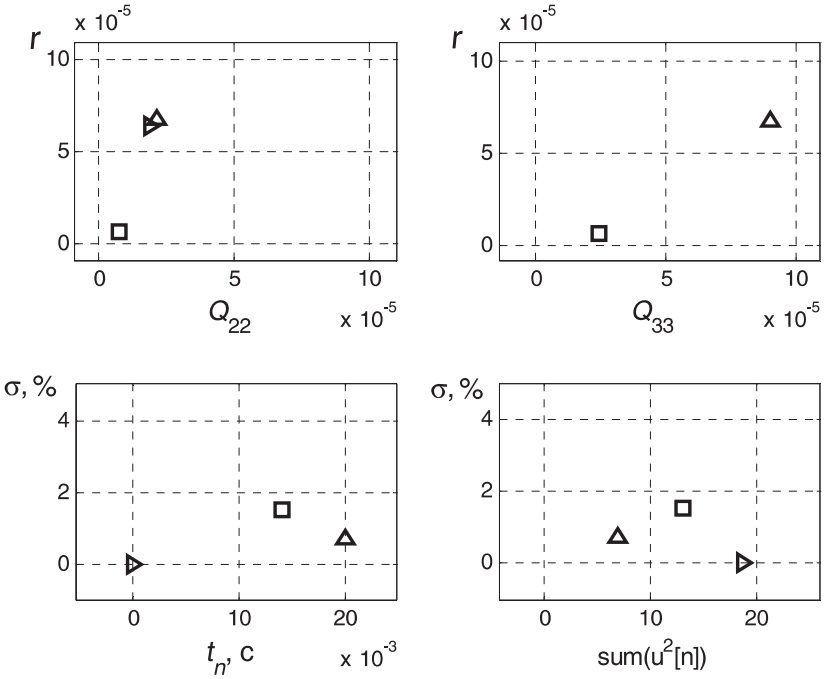


Рис. 7. Результаты зондирования в пространстве весов

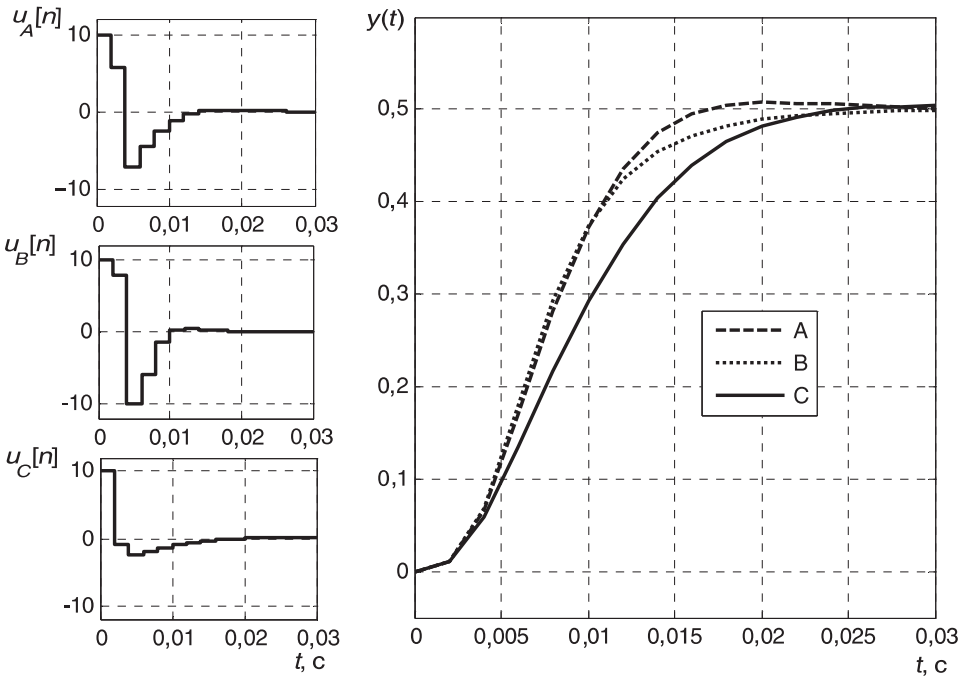


Рис. 8. Парето-оптимальные переходные процессы

проводится только в области устойчивости САУ. При этом общие затраты машинного времени дополнительно сокращаются за счет моделирования динамики САУ только в узлах, устойчивых с заданным запасом.

Для исключения в САУ статических ошибок многокритериальную оптимизацию МР следует проводить с обеспечением в них астатических свойств, используя методику синтеза, изложенную в [2, 6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козлов, В.Н.** Теория автоматического управления [Текст]/В.Н. Козлов, В.Е. Куприянов, В.А. Троицкий [и др.].–М.: Высш. шк., 2006.

2. **Козлов, В.Н.** Теория автоматического управления. Компьютерные технологии: Учеб. пособ. [Текст]/ В.Н. Козлов, Н.В. Ростов.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.

3. Куо, Б. Теория и проектирование цифровых систем управления [Текст]/Б. Куо; Пер. с англ.–М.: Машиностроение, 1986.

4. **Подиновский, В.В.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач [Текст]/В.В. Подиновский, В.Д. Ногин.–М.: Наука, 1982.

5. **Ростов, Н.В.** Параметрическая оптимизация цифровых модальных регуляторов [Текст]/Н.В. Ростов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2010. –№ 3.–с. 39–44.

6. **Ростов, Н.В.** Компьютерные технологии в науке. Синтез и оптимизация: Учеб. пособ. [Текст]/ Н.В. Ростов.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.

7. **Соболь, И.М.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст]/И.М. Соболь, Р.Б. Статников.–М.: Наука, 1981.

8. **Черноруцкий, И.Г.** Методы оптимизации в теории управления: Учеб. пособ. [Текст]/ И.Г. Черноруцкий.–СПб.: Питер, 2004.

9. **Ogata, K.** Discrete-Time Control Systems: 2 ed. [Текст]/K. Ogata.–Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995.

УДК 519.876

А.А. Салангин

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Методология проектирования технических систем – это логическая организация формализованных и неформализованных процедур для решения проблем их синтеза. Применяемые процедуры исследования технических систем опираются на методы математической статистики и регрессионного анализа, численные методы параметрической оптимизации, в основе которых используются следующие допущения:

возможность сравнения реакций модели и объекта;

однородность и независимость проводимых опытов;

математическая корректность задачи параметрической оптимизации;

аналитическое задание границ допустимой области параметров.

Для системного проектирования указанные допущения редко выполняются, что существенно ограничивает возможности применения классических формализованных процедур анализа и приводит к возникновению ряда проблем, среди которых:

невозможность построения адекватной модели методами идентификации параметров, которые основаны на сравнении реакций модели и еще несуществующего (проектируемого) объекта;

невозможность прямой оценки показателей функционирования по результатам опытов методами математической статистики, т. к. изменяются свойства и условия функционирования объекта в ходе его испытаний;

нереализуемость или неэффективность параметрической оптимизации показателей функционирования известными численными методами [1], т. к. при системном проектировании допустимая область задается алгоритмически, а сама постановка задачи математически некорректна из-за неопределенностей (целей, природы, конфликта) или из-за невыполнимости достаточных условий оптимальности стационарного решения (уравнений Куна-Таккера);

постановка и решение задач структурного синтеза плохо формализованы. Структурный анализ связан с ранжированием большого количества элементов систем, а структурный синтез имеет комбинаторный характер и целенаправленный перебор вариантов требует морфологического подхода.

Ограниченные возможности существующих подходов к исследованию проектируемых объектов требуют развития методологии системного проектирования и путей ее реализации.

Методология системного проектирования включает следующие направления:

определение структурных связей и требований к элементам на ранних стадиях системного проектирования;

выбор способов построения моделей проектируемых комплексов на основе различных уровней абстрактного описания и типовых схем;

оценка показателей функционирования проектируемых комплексов в процессе их разработки при заданных структуре, алгоритме поведения и значениях характеристик элементов;

выбор способов структурного и параметрического синтеза проектируемых комплексов путем целенаправленного перебора альтернативных вариантов для оптимального учета технологических ограничений.

В таблице представлена классификация уровней описания систем по основным понятиям, определениям, математическим методам решаемых задач, этапам разработки и результатам системных исследований. Выделение указанных уровней описания условно, т. к. в процессе разработки проектируемой системы объем информации о ней увеличивается и становится возможным использование более абстрактного (формализованного) описания на ранних стадиях.

На рис. 1 представлена общая схема методологии системного проектирования в виде сложного поэтапного процесса. В процессе построения модели каждый этап отличается от предыдущего степенью детализации моделируемой системы и способами описания ее структуры и процесса функционирования. При этом модель объекта становится все более формализованной.

Рассмотрим последовательно каждый из них.

Классификация уровней описания систем

Уровень	Основные понятия	Определение системы	Математический аппарат и решаемые задачи	Этап разработки и результаты системных исследований
Символьный и обще-алгебраический	Символы и правила (язык); множества и отношения	Совокупность взаимодействующих элементов. Множество элементов, находящихся в определенных отношениях	Теория графов и матриц, анализ структуры; теория групп и тензоров, сравнение классов систем	*Технические предложения:* структура связей и алгоритма, структурная значимость элементов и требования к ним
Логико-математический (и эвристический)	Операторы и алгоритмы, состояния	Совокупность элементов, функционирующих и взаимодействующих по определенным алгоритмам	Теория автоматов; анализ алгоритма функционирования	*Эскизный проект:* синтез алгоритмов, определяющих законы обработки информации и управления
Динамический	Изменение состояний и фазовые координаты, история жизни	Совокупность элементов, изменяющих состояния в пространстве и времени	Теория дифф. уравнений; регресс. анализ; анализ характеристик выполнения операций в отдельных режимах	*Технический проект:* анализ поведения (стат. оценка характеристик и связи ПФ$^{(*)}$ с ними)
Информационный	Показатели функционирования (ПФ), зависящие от историй жизни	Совокупность элементов, выполняющих определенный набор функций	Теория вероятностей и мат. статистика; анализ ПФ на их соответствие техническим требованиям	*Этап испытаний*: оценка изменения ПФ в заданном диапазоне условий применения, адекватности модели
Эвристический	Знание, рефлексия, неформальные процедуры, гипотезы о принятии решений	Совокупность техники и операторов, взаимодействующих по эвристическим принципам и правилам	Теория нечетких множеств и отношений; теория конфликтов; учет характеристик операторов систем «Человек-Машина»	*Все этапы*: распределение функций, оценка характеристик распознавание ситуаций и принятие решений, требования к средствам отбора и обучения

ПФ$^{(*)}$ – показатель функционирования

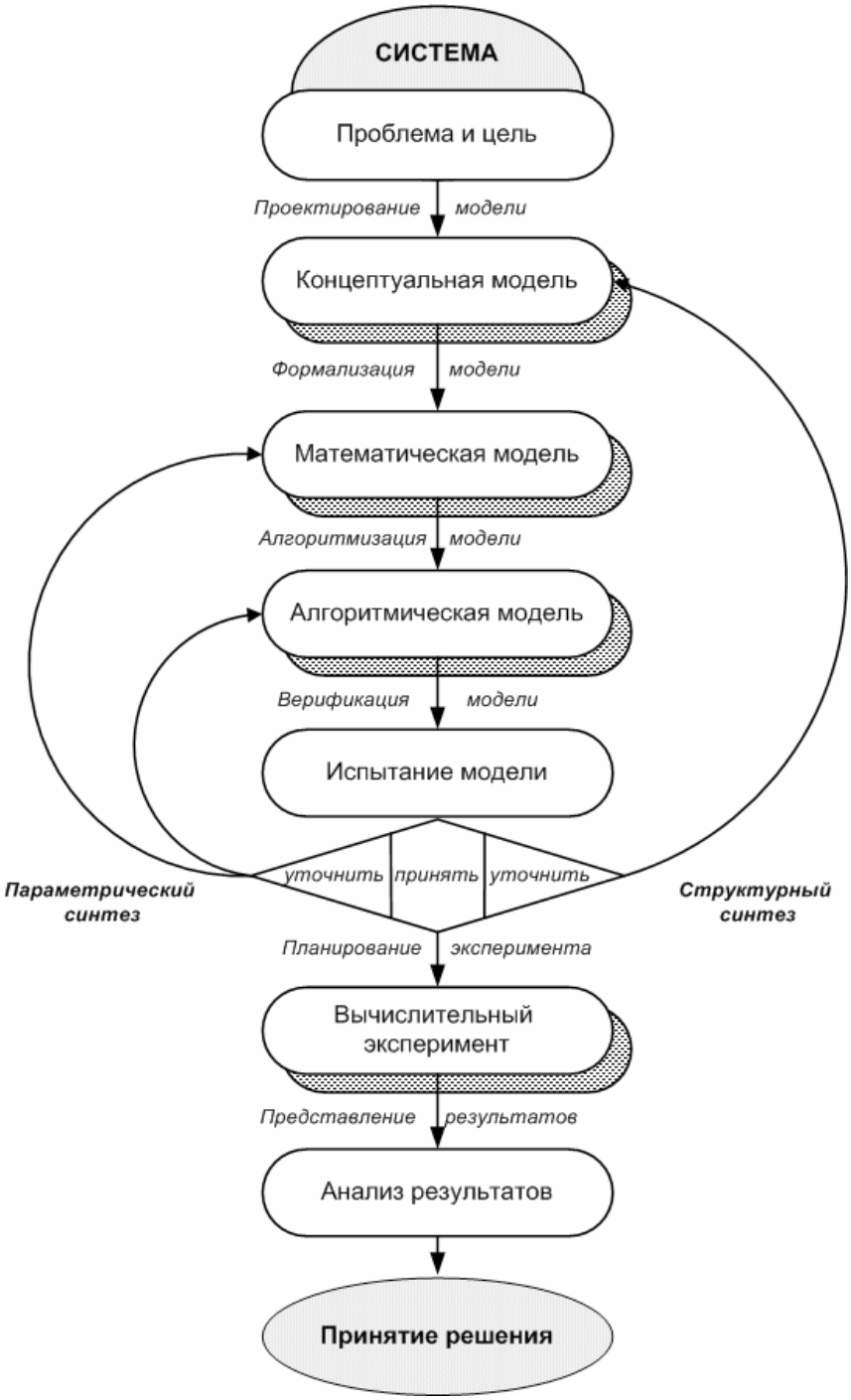


Рис. 1. Методологическая схема системного проектирования

1. *Формулировка системной проблемы и определение целей.*

На начальном этапе:

обосновывается сущность и место проектируемой системы;

обосновывается цель проектирования системы;

формируется структура проектируемой системы;

выявляется полное множество значащих факторов;

определяется функциональная зависимость между факторами.

Документированным результатом является содержательное описание объекта моделирования.

2. *Проектирование модели.*

Основное содержание этого этапа – формулировка общего замысла модели, переход от реальной системы к логической схеме ее функционирования – концептуальной модели, т. е. содержательному описанию моделируемой системы на неформальном языке. Концептуальное описание представляет собой упрощенное алгоритмическое отображение реальной системы. При разработке концептуальной модели определяются границы системы, приводится описание условий проектируемого объекта во внешней среде, формируются переменные, параметры, ограничения, критериальные функции, функциональные зависимости как для отдельных элементов и процессов, так и для всей системы.

При оценке показателя функционирования существуют проблемы учета изменений свойств проектируемого объекта и условий применения. Изменение свойств объекта в результате доработок можно учесть на основе гипотезы об экспоненциальном росте вероятности успешной работы [2]. Опираясь на гипотезу, можно приблизительно аппроксимировать «траекторию» испытаний и, следовательно, можно определить вероятность успешной работы на каждом испытании.

Изменения условий применения проектируемой системы можно учесть с помощью комбинированной оценки показателя функционирования на основе значимой выборки [3].

При определении зависимости показателя функционирования от факторов целесообразно использовать регрессионный анализ с ортогональным планированием факторных экспериментов на модели.

Для многокритериальных моделируемых систем исходную задачу стремятся свести к однокритериальной задаче путем:

свертки показателей функционирования;

выделения ведущего показателя функционирования;

применения метода последовательных уступок;

нахождения множества Парето.

Так, в задаче планирования испытаний [4] применяется свертка дисперсии F относительной погрешности статистической оценки показателя функционирования:

$$F = \sum_{i=1}^{n} \frac{\beta_i^2}{x_i} \to \min,$$

где $\beta_i^2 = \dfrac{1 - y_i}{y_i}$, x_i – количество испытаний i-го типа по определению вероятности y_i.

3. *Формализация модели*.

Цель этого этапа – получить формальное представление логико-математической модели, т. е. алгоритмов поведения компонент сложной системы и отразить на уровне моделирующего алгоритма вопросы взаимодействия между собой этих компонент. Концептуальная модель служит основой для разработки математической модели в терминах конкретного математического аппарата. Выбор того или иного математического аппарата обусловлен физической природой исследуемой системы и процессов, протекающих в ней.

Иллюстрацией может служить общая постановка задачи распределения требований к параметрам технического комплекса [4], которая формулируется как выбор устройств технического комплекса, характеристики которых (дисперсии погрешности x_i и вероятности отказа y_i) обеспечивали бы минимизацию стоимости F комплекса при ограничении на вероятность G выполняемых функций:

$$\begin{cases} F = \sum\limits_i \gamma_i \left(1 + \dfrac{\alpha_i}{\gamma_i} \ln \dfrac{x_i^0}{x_i}\right)\left(1 + \dfrac{\beta_i}{\gamma_i} \ln \dfrac{y_i^0}{y_i}\right) \to \min; \\ G(x_i, y_i) \le G_0 = 1 - P, \end{cases}$$

где P – вероятность выполнения комплексом тактической задачи.

4. *Алгоритмизация модели*.

В качестве программных средств алгоритмизации модели могут быть использованы процедурно-ориентированные или проблемно-ориентированные алгоритмические языки, а также специализированные пакеты программ автоматизированного моделирования сложных систем. После алгоритмизации модели составляется программный код на алгоритмическом языке высокого уровня (Си, Паскаль и др.)

Для типовых задач оптимального распределения ресурсов, возникающих при системном проектировании [4, 5], строятся итерационные процедуры поиска и уточнения начального приближения x^0 к решению. При этом используются:

свойство рабастности оптимального решения (слабого влияния искажений исходных соотношений и ошибок вычислений);

приближенные аналитические выражения для критериальной функции F и функции ограничения G.

Первый подход к построению таких итерационных процедур основан на линеаризации в окрестности x^0 уравнений Куна–Таккера для исходной задачи и ее замене последовательностью задач линейного или квадратичного программирования. Исходную задачу оптимизации можно свести к последовательности N задач оптимизации, если для k-го шага записать $x^{k+1} = x^k + \varepsilon^k$, а поправку ε^k находить из условия равномерного приближения к G_0:

$$\begin{cases} -\Delta F = F^k - F^{k+1} \to \max, \\ \Delta G = G^{k+1} - G^k = \delta^k, \quad \delta^k = \dfrac{G_0 - G^k}{N - k}. \end{cases}$$

При достаточно больших N , т. е. малых величинах δ^k, будут малыми и компоненты ε^k вектора поправок. Поправки ε^k находят, добиваясь максимального уменьшения целевой функции F на каждом k шаге, т. е решая эквивалентную систему уравнений с точностью до величин второго порядка (в рамках квадратичной теории):

$$\begin{cases} -F \cong -(f,\varepsilon) - \dfrac{1}{2}(\varepsilon, V\varepsilon) \to \max; \quad f_i = \dfrac{dF}{dx_i}, \quad g_i = \dfrac{dG}{dx_i}, \\ \Delta G \cong (g,\varepsilon) + \dfrac{1}{2}(\varepsilon, W\varepsilon) = \delta, \; V = \left\| \dfrac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} \right\|, \; W = \left\| \dfrac{\partial^2 G}{\partial x_i \partial x_j} \right\|, \end{cases}$$

где $\lambda_i = -\dfrac{f_i}{g_i}$ – параметрический множитель Лагранжа.

Во втором подходе, называемом *магистральным методом*, предлагается общий итерационный метод решения математически корректных задач параметрической оптимизации при алгоритмическом задании ограничений, обеспечивающий автоматический учет дискретности и возможной необратимости распределения ресурсов, аналитическую проверку условий оптимальности действий и слабую чувствительность к искажениям модели.

В магистральном методе задача по нахождению оптимального решения системы уравнений Куна–Таккера заменяется на эквивалентную задачу итерационной процедуры сближения параметрических множителей $\lambda_1 \to \lambda_2 \to \ldots \lambda$ внутри допустимой области с выходом на ее границу (рис. 2). На рис. 2 изображены для двухмерного случая λ-магистрали как линии, на которой некоторые параметрические множители равны между собой, и G-магистрали ограничения как границы допустимости области, вдоль которой $G(x) = G_0$. При сходимости процесса в предельной точке все множители должны быть равны, а магистрали – пересекаться. Алгоритм поиска решения строится на выполнении трех положений:

Положение 1: если $\lambda_1 > \lambda_2$ и $\delta > 0$, то необходимо изменять только одну переменную, двигаясь вдоль одной из координат.

Положение 2: если $\lambda_1 = \lambda_2$ и $\delta > 0$, то необходимо изменять x_1 и x_2 так, чтобы сохранялось равенство параметрических множителей Лагранжа (т. е. двигаться по λ-магистрали).

Положение 3: если $\lambda_1 \neq \lambda_2$, $\delta = 0$ то необходимо изменять x_1 и x_2 так, чтобы сохранялось равенство $\delta = 0$ (т. е. двигаться вдоль границы допустимой области – по G-магистрали).

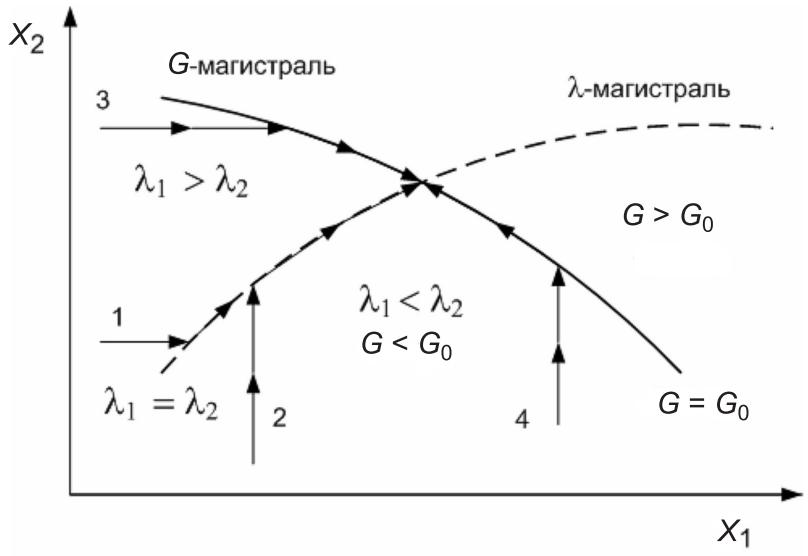


Рис. 2. Геометрическая иллюстрация магистрального метода в двухмерном случае

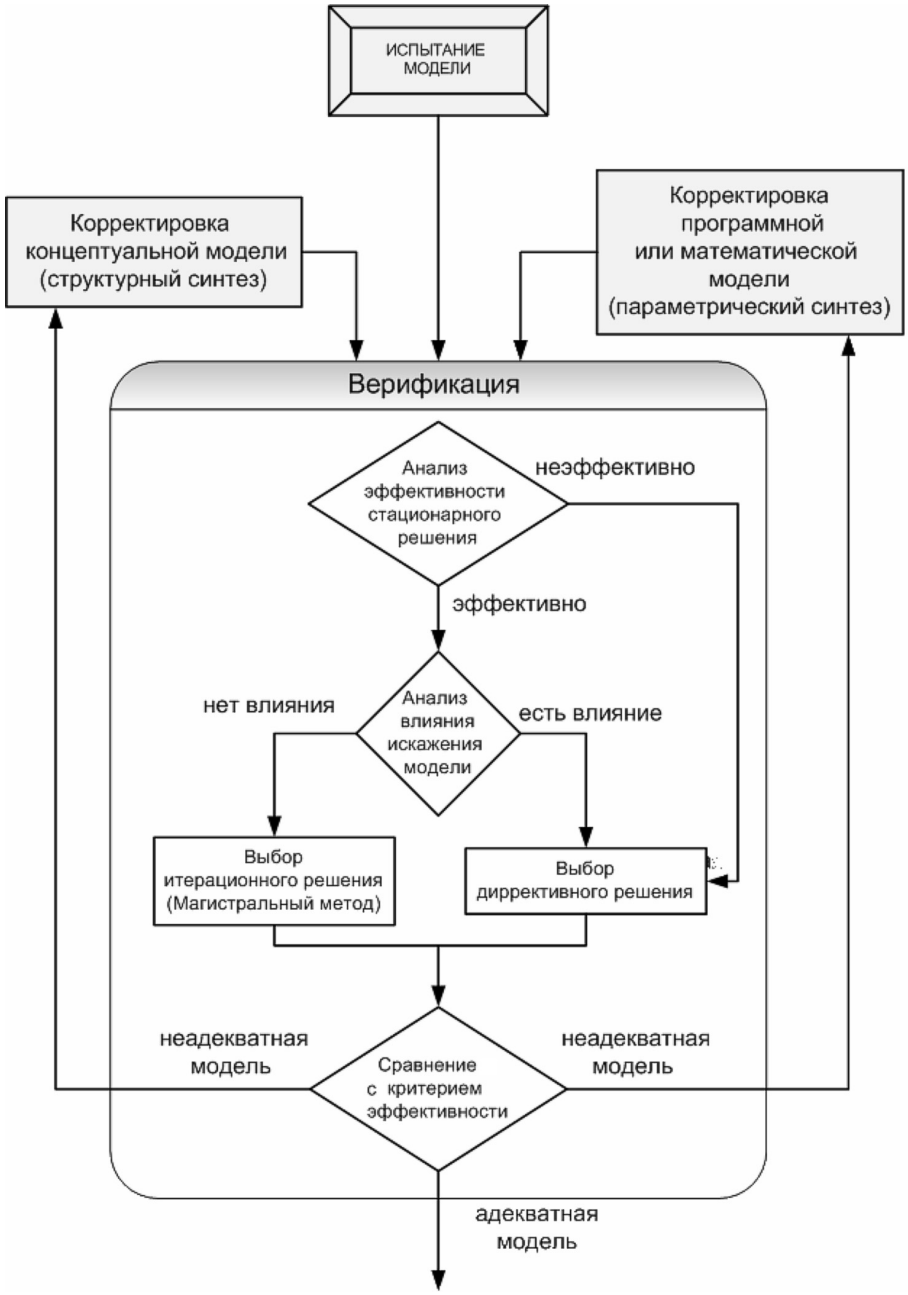


Рис. 3. Схема верификации модели

5. *Верификация модели*.

Одним из основных требований, предъявляемых к модели, является ее адекватность реальной системе, которая достигается за счет использования моделей с различным уровнем детализации. Для проектируемых объектов проверка на адекватность модели (верификация) затруднена, т. к. модель предшествует объекту, и поэтому уточнить модель можно только путем построения ряда усложняющихся моделей с точки зрения различных уровней абстрактного описания (см. табл.). На рис. 3 представлена схема верификации модели, которая использована при реализации методологии в типовых задачах системного проектирования – планирования испытаний, распределения требований к элементам системы, разработки и реализации проекта [4, 5].

6. *Планирование эксперимента*.

Исследования на моделях заключаются в проведении экспериментов, в процессе которых

определяются характеристики системы при разных значениях структурно-функциональных параметров. Большая номенклатура исходных параметров и широкий диапазон их изменения требует предварительного планирования выполняемых на модели вычислительных экспериментов.

На практике наиболее широко распространены следующие типы вычислительных экспериментов:

оценка и сравнение средних и дисперсий различных альтернатив (однофакторные эксперименты);

задача интерполяции: определение влияния управляемых параметров, переменных (факторов) на результаты экспериментов с использованием дисперсионного и регрессионного анализа;

задача оптимизации: поиск оптимальных значений на некотором множестве возможных значений переменных, многокритериальная оптимизация.

7. *Представление результатов*.

Анализ результатов моделирования направлен на выявление свойств, присущих исследуемой системе, и включает в себя следующие этапы:

обработка результатов для удобства последующего анализа и использования. На этом этапе выделяются результаты, наиболее важные с точки зрения исследователя и с учетом целей исследования, которые представляются в форме, наиболее удобной для изучения свойств проектируемой системы;

определение зависимостей характеристик от параметров системы путем варьирования исходных параметров структурно-функциональной организации с целью выявления и формулирования свойств проектируемой системы.

8. *Принятие решения*.

На заключительном этапе принимается решение о работоспособности исследуемой системы и вырабатываются рекомендации по наиболее эффективной и рациональной организации проектируемой или модернизируемой системы, которые могут быть использованы в дальнейшем при решении задач системного проектирования.

Реализация предложенной методологии в типовых задачах системного проектирования рассмотрена в работах [4, 5] с точки зрения постановки проблемы и цели; построения концептуальной и математической модели; испытания модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Черноруцкий, И.Г.** Методы оптимизации в теории управления: Учеб. пособ. [Текст]/ И.Г. Черноруцкий.–СПб.: Питер, 2004.–256 с.

2. **Пупков, К.А.** Интеллектуальные системы (исследование и создание) [Текст]/К.А. Пупков, В.Г. Коньков.–М.: МГТУ, 2003.–343 с.

3. **Железнов, И.Г.** Сложные технические системы (оценка характеристик): Учеб. пособ. [Текст]/ И.Г. Железнов.–М.: Высш. шк., 1984.–117 с.

4. **Салангин, А.А.** Методология системного анализа проектируемых технических комплексов: Монография [Текст]/А.А. Салангин.–Псков: ППИ, 2009.–280с.

5. **Салангин, А.А.** Современные проблемы автоматизации и управления: Учеб. пособ. [Текст]/А.А. Салангин, Ю.М. Смирнов, В.П. Шкодырев. –СПб.: СПбГПУ, 2010.–160 с.

УДК 004.514, 004.655.3, 004.652.42

С.Г. Попов

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕПОЗИТОРИЯ СХЕМ РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗ ДАННЫХ

Обзор существующих реализаций репозиториев баз данных

Основной способ совместного использования баз данных – интеграция на основе реляционного репозитория – хранилища описаний схем. Управление схемами осуществляется пользователями при помощи операторов языка управления данными конкретной системы управления базами данных, в ходе исполнения которых происходит изменение содержимого репозитория.

Исследование методов интеграции данных организованных на различных моделях данных (реляционной, сетевой, иерархической), показало [3, 4], что под моделью данных M_i подразумевается четверка вида $\langle Sch_i, Ms_i, O_i, Mo_i \rangle$, где Sch_i – все возможные схемы модели M_i, отображаемые ЯОД; O_i – все возможные операторы ЯМД M_i; Ms_i – семантическая функция ЯОД M_i; а Mo_i – семантическая функция ЯМД M_i.

Отображением f модели данных M_j в модель M_i называется совокупность отображений пространства состояний баз данных M_j в пространство состояний M_i – ψ; схем баз данных состояний M_j в схемы баз данных M_i – $\sigma : Sch_j \rightarrow Sch_i$; операторов ЯМД M_i в последовательность ЯМД M_j $\varphi : O_i \rightarrow P_j$, где $p_j \in P_j$ – процедура на ЯМД M_j.

На практике в СУБД применяются реляционные операторы, реализованные в форме алгоритмических процедур: в качестве операторов используются логические операторы объединения ($r \cup s$), пересечения ($r \cap s$) и реляционные операторы выбора ($\sigma_{A=a}(r)$), проецирования ($\pi_X(r)$), соединения ($r \triangleright\triangleleft s$) и деления отношений ($r \div s$) в нотации Гарсиа–Молина.

Учитывая, что в современных СУБД репозитории реализованы в форме реляционных баз данных и уже содержат некоторые функции интеграции внутри одной СУБД, например, в MySQL и Oracle, а операторы ЯОД управляют данными в этой схеме, с практической точки зрения следует рассматривать ЯОД СУБД и базу данных репозитория как единую подсистему управления схемой хранимых БД.

Выберем в качестве критериев сравнения репозиториев современных СУБД следующие:

возможности интеграции – обеспечение прозрачного объединения данных в нескольких СУБД;

методы доступа – описание средств управления схемами в репозитории;

способ хранения – способ внутреннего представления данных пользователю;

средства оптимизации – наличие средств оптимизации внутреннего представления репозитория.

Результаты сравнения интеграционных возможностей пяти подсистем репозиториев современных СУБД приведены в табл. 1. Приведенные данные показывают, что интеграция реляционных баз данных на основе существующих репозиториев современных СУБД трудоемка в силу:

закрытости внутренних форматов репозиториев;

отсутствия прямого доступа к структурам репозиториев;

наличия диалектов ЯОД конкретной СУБД;

отсутствия средств интеграции РСУБД разных производителей;

отсутствия высокоуровневого средства управления схемами;

отсутствия средств оптимизации объема репозитория и фрагментарное развитие средств оптимизации времени доступа к репозиторию.

Таблица 1

Интеграционные возможности репозиториев СУБД

СУБД	Возможности интеграции	Метод доступа	Способ хранения	Средства оптимизации
Oracle	В рамках одной СУБД	Средствами ЯОД и ЯМД и управления пользователями (схемами)	Доступ на чтение через системный словарь	Отсутствуют
DB2	То же	Средствами управления схемами	Объектная модель экземпляра	«
MSSql	«	Средствами управления схемами	Закрытая объектная модель	«
MySQL	«	Средствами ЯОД и ЯМД	РБД метаданных	«
PostGreeSQL	«	Средствами управления схемами	То же	«

Вышеизложенные ограничения препятствуют эффективному обмену данными между СУБД разных производителей и затрудняют интеграционные процессы между СУБД.

Постановка задачи интеграции баз данных

Дополнив модель интеграции данных дополнительными ограничениями (модель данных единственна; реляционная M_{Rel}; схемы базы данных выбираются из одного множества реляционных схем Sch_{Rel}; операторы O_{Rel_i} ЯОД модели M_{Rel} – разномощностные реализации диалектов языков структурированных запросов, основанных на реляционной алгебре), задача интеграции реляционных баз данных сводится к обеспечению биэктивности отображения ψ.

В реляционной модели M_{Rel} с сигнатурой алгебры $Rel(T)$, множеством всех схем Sch_{Rel}, и множеством O_{Rel} -операторов, которые могут быть сконструированы средствами диалектов ЯМД реляционной модели, определено конечное число баз данных со множеством схем Sch'_{Rel} так, что $Sch'_{Rel} = \{sch^{(1)}, sch^{(2)}, ..., sch^{(n)}\} \subset Sch_{Rel}$, причем каждая выбранная схема реализуется на своем остове $T^{(i)}$, из множества остовов Ost_{Rel}: $Ost'_{Rel} = \{T^{(1)}, T^{(2)}, ..., T^{(n)}\} \subset Ost_{Rel}$ так, что $T^{(i)} \subset N^{(i)} \times V^{(i)}$, где $i = \{1, 2, ..., n\}$, $N^{(i)}$ – множество атрибутов, а $V^{(i)}$ – множество значений атрибутов в каждой схеме. Каждая схема $sch^{(i)}$ определяется набором функциональных отношений $R^{(i)}_{t_l}$:

$$\begin{array}{llll} R^{(1)}_1\left(A^{(1)}_{1_1}, A^{(1)}_{1_2}, \ldots, A^{(1)}_{1_{k^{(1)}_1}}\right) & R^{(2)}_1\left(A^{(2)}_{1_1}, A^{(2)}_{1_2}, \ldots, A^{(2)}_{1_{k^{(2)}_1}}\right) & \ldots & R^{(n)}_1\left(A^{(n)}_{1_1}, A^{(n)}_{1_2}, \ldots, A^{(n)}_{1_{k^{(n)}_1}}\right), \\ R^{(1)}_2\left(A^{(1)}_{2_1}, A^{(1)}_{2_2}, \ldots, A^{(1)}_{1_{k^{(1)}_2}}\right) & R^{(2)}_2\left(A^{(2)}_{2_1}, A^{(2)}_{2_2}, \ldots, A^{(2)}_{1_{k^{(2)}_2}}\right) & \ldots & R^{(n)}_2\left(A^{(n)}_{2_1}, A^{(n)}_{2_2}, \ldots, A^{(n)}_{1_{k^{(n)}_2}}\right), \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R^{(1)}_{t_1}\left(A^{(1)}_{t_{11}}, A^{(1)}_{t_{12}}, \ldots, A^{(1)}_{t_{1k^{(1)}_l}}\right) & R^{(2)}_{t_2}\left(A^{(2)}_{t_{21}}, A^{(1)}_{t_{12}}, \ldots, A^{(2)}_{t_{1k^{(2)}_2}}\right) & \ldots & R^{(n)}_{t_l}\left(A^{(n)}_{t_{l_1}}, A^{(n)}_{t_{l_2}}, \ldots, A^{(n)}_{t_{lk^{(n)}_f}}\right), \end{array} \quad (1)$$

где $R^{(n)}_{t_l}$ – t_l-е функциональное отношение в схеме базы данных $Sch^{(n)}$; $A^{(n)}_{t_{lk^{(n)}_f}}$ – $k^{(n)}_f$ атрибут t_l-го функционального отношения в схеме базы данных $Sch^{(n)}$.

Обозначим наборы атрибутов каждой схемы

$$at\left(DB^{(1)}\right) = \bigcup_{i=1}^{l_1}\left(R^{(1)}_i\right), at\left(DB^{(2)}\right) = \\ = \bigcup_{i=1}^{l_2}\left(R^{(2)}_i\right), \ldots, at\left(DB^{(n)}\right) = \bigcup_{i=1}^{l_n}\left(R^{(n)}_i\right) \quad (2)$$

и конечные множества доменов каждой базы данных

$$D^{(1)} = \left\{D^{(1)}_1, D^{(1)}_2, ..., D^{(1)}_{m_1}\right\},$$
$$D^{(2)} = \left\{D^{(2)}_1, D^{(2)}_2, ..., D^{(2)}_{m_2}\right\}, \quad (3)$$
$$D^{(n)} = \left\{D^{(n)}_1, D^{(n)}_2, ..., D^{(n)}_{m_n}\right\},$$

так, что для каждого $D^{(i)}_t$ существует $A^{(i)}_{t_k}$, такое, что $D^{(i)}_t = Dom\left(A^{(i)}_{t_k}\right)$.

Тогда под задачей интеграции независимых реляционных баз данных будем понимать построение базы данных $BD^{(Uni)}$ со схемой $Sch^{(Uni)}$, содержащей функциональные отношения

$$R^{(Uni)}_1\left(C^{(Uni)}_{1_1}, C^{(Uni)}_{1_2}, \ldots, C^{(Uni)}_{1_{x_1}}\right),$$
$$R^{(Uni)}_2\left(C^{(Uni)}_{2_1}, C^{(Uni)}_{2_2}, \ldots, C^{(Uni)}_{2_{x_2}}\right), \quad (4)$$
$$\ldots$$
$$R^{(Uni)}_l\left(C^{(Uni)}_{l_1}, C^{(Uni)}_{l_2}, \ldots, C^{(Uni)}_{l_{x_f}}\right)$$

и с языком манипулирования данными $O^{(Uni)}$, основанным на реляционной алгебре $Rel(T)$.

Методика интеграции реляционных баз данных

Для решения задачи построения оптимального репозитория необходимо основываться на базовых принципах оптимальности, интегрируемости, полнофункциональности и открытости.

Интегрируемость – формирование правильного биективного отображения $\sigma : Sch_j \to Sch_i$, определяющего возможность отображения, и, как следствие, объединения реляционных схем независимых баз данных.

Открытость – формирование набора отображений семантических функций диалектов ЯОД модели M_{Rel} $Ms_i : Sch_i \to B_i$, что обеспечивает отображение набора функций интеграции произвольных реляционных баз данных.

Полнофункциональность – формирование полного набора семантических функций подсистемы интеграции Ms_{Uni}, аналогично предоставлению универсального интерфейса к функциям управления схемами и средствам интеграции.

Оптимальность – минимизация занимаемого объема данных в репозитории Sch_{Uni} и времени доступа в процессе реализации функций Ms_{Uni} интеграции баз данных.

Функциональные отношения интегрированной базы данных $R^{(Uni)}_l$ можно формировать двумя способами: включением исходных функциональных отношений интегрируемых баз данных и дополнением новыми. Второй набор отношений отражает новые семантические связи между базами данных и вводится извне, определяя новую схему интегрируемой базы данных.

Представим схему интегрируемых баз данных в форме направленного псевдографа $G(V, N, L)$, где V – множество атрибутов отношений схемы s_i; N – множество ребер, маркированных идентификатором отношения включения атрибута в отношение; L – множество троек вида (X_r, r, Y_r), маркированных идентификатором функциональных зависимостей исходных баз данных s_i; X_r – множество атрибутов детерминантов; Y_r – множество атрибутов, функционально зависящих от детерминанта; r – маркер функционального отношения. Тогда доопределение связей в базе данных состоит в формировании графа $G'(V, N, L')$, такого, что $L' = (L \cup \{X', r', Y'\} \,|\, X'_i \subset s_i, Y'_j \subset s_j, i \neq j$.

Определим объем данных интегрированной схемы V_{Uni} базы данных $BD^{(Uni)}$ как сумму объемов данных, входящих в набор функциональных отношений схемы $Sch^{(Uni)}$. Определив способ хранения схем в форме реляционной базы данных, получим набор эквивалентных схем репозитория *Sheme*. Тогда объем схемы данных интегрированной БД определяется как объем данных в БД репозитория, который зависит от представления схемы репозитория $Sheme = \{sheme_1, ..., sheme_j\}$ и от числа и содержания схем независимых интегрируемых баз данных $S = \{s_1, s_2, ..., s_n\}$, а среднее время выполнения запросов к репозиторию зависит от частот появления операций управления схемами разных типов $\alpha_Q = \{\alpha_{Select}, \alpha_{Insert}, \alpha_{Delete}, \alpha_{Integraty}\}$ на этапе исполнения приложения.

Тогда задача оптимизации подсистемы интеграции баз данных на основе репозитория определяется как

$$\min_{\{\alpha_Q\}} \sum t_\alpha \min_{\{S\}} V\{Scheme\}, \quad (5)$$

где t_α – время исполнения запроса определенного типа из множества α_Q; V – функция определения объема данных репозитория на схеме $sheme_i$ из множества схем репозитория *Sheme*, при условии заданного на этапе эксплуатации распределения вероятности запросов α_Q.

Методика оптимизации репозитория и оценки времени отклика подсистемы интеграции на этапе эксплуатации, основана на:

1) фиксации времен выполнения операций добавления, удаления и выборки данных в конкретной СУБД, на которой функционирует репозиторий;

2) определении объемов схем интегрируемых баз данных в каждом из вариантов реализации схемы репозитория;

3) фиксации начального распределения частот выполнения операций добавления, удаления и выборки схем внешних баз данных из репозитория схем;

4) вычислении времени отклика системы на каждый из типов запросов на каждом варианте схемы репозитория;

5) выборе оптимальной конфигурации репозитория и фиксации оценок времени выполнения запроса на декомпозицию в худшем случае;

6) фиксации события добавления, удаления, реинтеграции или изменения частотного соотношения запросов, требующих реконфигурации системы;

7) принятии решения о реконфигурации и повторении выполнения предыдущих этапов методики.

Для определения времен исполнения запросов на управление интеграционными данными в репозитории предложены пять алгоритмов управления схемами.

Объектами управления в информационной подсистеме репозитория являются схемы баз данных $s = \{K(A, db, T, F), Lf_i, f_j \mid \forall f_i, F_j \in F, i \neq j\}$ из множества схем S, операции управления схемами репозитория $Z(S) = \{z_{Select}(s_i), z_{Insert}(s_i), z_{Delete}(s_i), z_{Integraty}(s_i)\}$ и консолидированные запросы на выборку данных $q = \{q_1, q_2, ..., q_n\}$ к данным из объединенного репозитория.

Алгоритмы управления репозиторием

Введем полнофункциональный набор операций управления репозиторием, к которому относятся операторы добавления, удаления, доопределения связей, извлечения схемы и декомпозиции запроса.

1. Добавление новой схемы в репозиторий z_{Insert}.

Require: s_i; {схема базы для добавления}

Ensure: $DB_{Uni} + s_i$;

1: **for all** $DB_{Uni} \in scheme_i$ **do**

2: **for all** $T_s \in s_i$ **do**

3: $T_s \rightarrow T_{Uni}$;

4: **for all** $F_s \in s_i$ **do**

5: $F_s \rightarrow F_{Uni}$;

2. Доопределение семантических связей $z_{Integraty}$.

Require: $X_{r_{s_i,s_j}}$; {набор доопределяемых связей}

Ensure: $DB_{Uni} + X_{r_{s_i,s_j}}$;

1: **for all** $F_s \in X_{r_{s_i,s_j}}$ **do**

2: $F_s \rightarrow X_{Uni}$;

3. Удаление схемы из репозитория с удалением доопределенных связей z_{Delete}.

Require: $s_i, X_{r_{s_i,s_j}}$; {схема базы для удаления и набор доопределяемых связей}

Ensure: $DB_{Uni} - s_i$;

1: **for all** $DB_{Uni} \in scheme_i$ **do**

2: **for all** $T_s \in s_i$ **do**

3: $T_s \xrightarrow{\setminus} T_{Uni}$;

4: **for all** $F_s \in s_i$ **do**

5: $F_s \xrightarrow{\setminus} F_{Uni}$;

6: **for all** $F_s \in X_{r_{s_i,s_j}}$ **do**

7: $F_s \xrightarrow{\setminus} X_{Uni}$;

4. Декомпозиция схемы z_{Select}.

Require: $q_i(atr_1, atr_2, \ldots, atr_n)$; {запрос на декомпозицию данных}

Ensure: $F(s_1, s_2, \ldots, s_i)$; {набор атрибутов из разных схем баз данных}

1: **for all** $T_q \in q_i$ **do**

2: **for all** $DB_{Uni} \in scheme_i$ **do**

3: **for all** $t_{Uni_i} \triangleright\triangleleft t_{Uni_j} \in scheme_i$ **do**

4: $F_{s_i} \leftarrow atr_k$;

Предложеные четыре алгоритма позволяют оценить время исполнения каждой из операций в зависимости от формы представления репозитория, что помогло сформировать аналитические оценки времени доступа и объема репозитория.

Представив репозиторий в виде фиксированного набора атрибутов и первичного набора функциональных зависимостей, используя правила вывода, основанные на аксиомах Армстронга, получили 32 набора схем репозитория, которые затем были классифицированы. В качестве критерия классификации схем предложено правило размещения атрибутов по функциональным отношениям. Тогда все схемы репозитория классифицируются по числу отношений. В качестве тестовых выбраны пять схем, в каждой из которых

Таблица 2

Характеристики классов схем репозиториев

Класс схемы	Оценка объема, V	Добавление, z_{Insert}	Удаление, z_{Delete}	Декомпозиция, z_{Select}
1 отношение	$6c_v r_s$	$6c_t t_r$	$t_r + t_f$	$5c_t * l_s * t_r$
2 отношения, 1 зависимость	$\frac{r_s}{2c_v}$	$4c_t t_r + t_f$	$2t_r + 2t_f$	$4c_t * l_s * t_r + t_f$
3 отношения 2 зависимости	$\frac{r_s}{3c_v}$	$6c_t t_r + 2t_f$	$3t_r + 2t_f$	$3c_t * l_s * t_r + 2t_f$
4 отношения 3 зависимости	$\frac{r_s}{4c_v}$	$8c_t t_r + 3t_f$	$4t_r + 3t_f$	$2c_t * l_s * t_r + 3t_f$
5 отношений 4 зависимости	$\frac{r_s}{5c_v}$	$10c_t t_r + 4t_f$	$5t_r + 4t_f$	$l_s * t_r + 4t_f$

присутствуют 1–5 функциональных отношений с нулем, 1–4 нетривиальными внешними функциональными отношениями соответственно.

Пусть в тестовой схеме внешней базы данных s_i определены: r_s – число атрибутов в схеме s_i; c_V – коэффициент увеличения объема данных при отсутствии нормализации; t_r – время управления отношением; t_f – время управления зависимостью; l_s – число отношений в запросе; c_t – коэффициент времени на формирование избыточности в отношении. Получим аналитические оценки времени исполнения и объема данных в каждом классе схем. Результаты анализа времени, исполнения и оценки объема данных различных вариантов реализации схем репозитория приведены в табл. 2.

На основе реализованных алгоритмов для каждой схемы и внешней базы выполнена загрузка данных с последующим вычислением общего объема данных в репозитории. Зависимости объемов данных репозитория от вариантов реализации схем при числе атрибутов в каждом отношении равном 100 приведены на рис. 1.

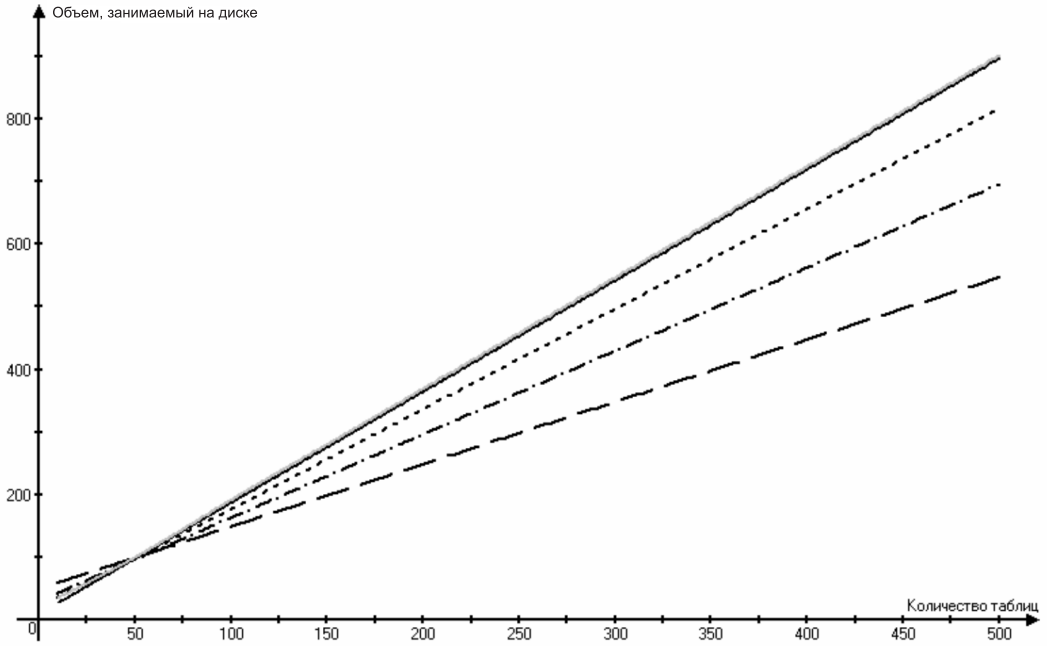


Рис. 1. Зависимость объема репозитория от варианта реализации схемы
(————) Репозиторий 1; (— —) Репозиторий 2; (----------) Репозиторий 3;
(—·—·—·—) Репозиторий 4; (·····) Репозиторий 5

Полученные данные позволили оценить объем данных при выполнении операций управления схемами в репозитории разных классов, что помогло прогнозировать временные характеристики управления репозиторием при известном распределении времени исполнения запросов, и представить оценку среднего времени исполнения запроса как

$$t_{Uni} = \alpha_{Insert} * t_{Insert} + \alpha_{Delete} * t_{Delete} + \alpha_{Select} * t_{Select}. \quad (6)$$

Максимальное время исполнения запроса декомпозиции $t_{Uni} = t_{Select} |\max len(q_i)$, где $len(q_i)$ – функция определения числа естественных соединений в схеме репозитория $scheme_i$, а функция оптимизации в форме нахождения минимума на дискретном наборе значений времени и объемов данных с весовыми коэффициентами k_t и k_V соответственно:

$$F = k_t t_{Uni} + k_V * V_{scheme}. \quad (7)$$

Предложенная функция применяется в алгоритме принятия решения о необходимости изменения структуры репозитория баз данных.

Разработанный метод реализует предложенный полнофункциональный набор операторов управления схемами, включающий в себя средства управления репозиторием, взаимодействия с внешними базами данных и прикладным ПО системы. Управление схемами внешних баз данных предполагает извлечение, преобразование и анализ схем – создание формальной модели управления схемами и обработку запросов пользователей в этой модели. Совокупность модели и методов составляет автоматизированную систему интеграции баз данных.

На основе предложенных алгоритмов реализована подсистема интеграции реляционных баз данных.

Реализация и апробация подсистемы интеграции

На вход подсистемы поступают описания схем баз данных, запросы пользователей на интеграцию данных и критерии оптимизации подсистемы. Выход подсистемы – описание декомпозиции интегрированных запросов пользователей с целью обращения к внешним базам данных с учетом требований к объему данных и времени доступа к репозиторию.

Подсистема позволяет пользователю до исполнения запроса оценить временные затраты на декомпозицию запроса к независимым базам данных, что помогает строить системы интеграции с заранее известным временем отклика.

В ходе разработки информационной системы выделены и проанализированы информационные и управляющие потоки, а также определены распределения вероятностей событий в этих потоках. Диаграмма потоков работ в нотации Йордона – Де Марко приведена на рис. 2.

В результате анализа выявлены и описаны семь функций системы, свойства двух внешних источников данных и двух информационных хранилищ, выделены десять управляющих потоков и двенадцать потоков данных.

Особенность предложенной декомпозиции потоков данных – разделение процессов анализа и изменения (оптимизации) репозитория, что позволило уменьшить временные затраты на функционирование процессов.

На основе предложенной декомпозиции задачи реализована система управления интеграцией баз данных. Включенная в нее подсистема управления оптимальным репозиторием организована по модульному принципу и содержит следующие модули:

Интерфейса с внешними базами данных. Модуль осуществляет взаимодействие с внешними базами данных, преобразуя описание схемы с конкретного диалекта ЯМД РСУБД во внутренний формат программы.

Анализа оптимальности репозитория. Модуль вычисляет значение критерия эффективности текущего состояния базы данных и, в случае нахождения иного, оптимального решения, формирует запрос на реконфигурацию репозитория.

Изменения схемы репозитория. Модуль принимает запрос на изменение структуры репозитория и формирует набор команд на языках управления $ЯМД_{Uni}$ и $ЯОД_{Uni}$ с целью преобразования структуры репозитория.

Декомпозиции запросов пользователя. Модуль на входе получает запрос пользователя и осуществляет выделение частей запроса, относящихся к каждой независимой базе данных.

Разработанная оптимизирующая подсистема интеграции данных на основе реляционного репозитория схем баз данных предоставляет единую форму представления репозитория для всех РБД, полнофункциональный универсальный

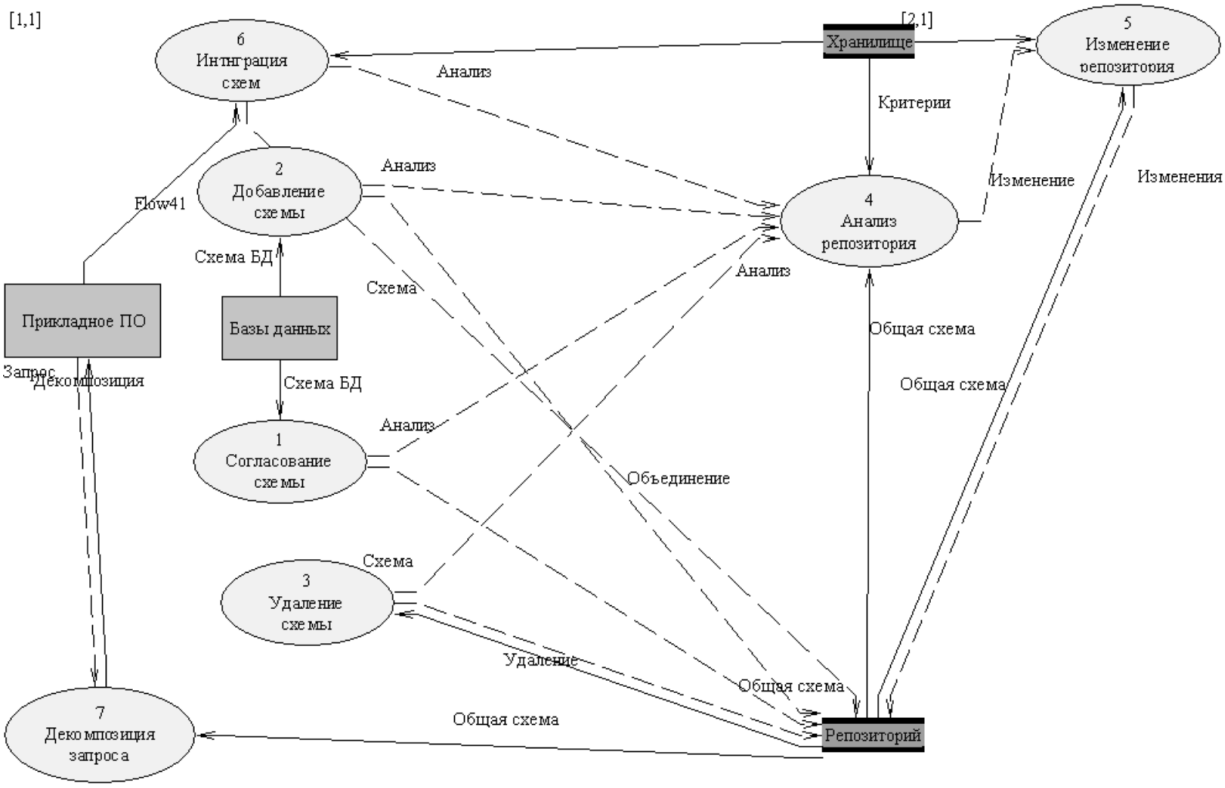


Рис. 2. Диаграмма потоков данных подсистемы управления интеграцией БД

язык управления содержимым репозитория с возможностью прогнозирования объема и времени доступа к схемам.

Созданная компонента применена в подсистеме интеграции системы управления учебным процессом Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и электронной системе мониторинга технологических компетенцией предприятий машиностроительного комплекса Северо-Западного региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Курочкин, М.А.** Метод интеграции независимых баз данных [Текст]/М.А. Курочкин, С.Г. Попов// Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2006.–№ 4. –С. 28–32.

2. **Курочкин, М.А.** Методология проектирования системы управления учебным процессом университета [Текст]/М.А. Курочкин, С.Г. Попов//Фундаментальные исследования в технических университетах: Матер. X Всерос. конф. по проблемам высшей школы.–СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.

3. **Попов, С.Г.** Исследование вариантов реализации схем реляционного репозитория схем баз данных [Текст]/С.Г. Попов//Высокие интеллектуальные технологии в образовании и науке: Матер. XVII Междунар. науч.-метод. конф.–СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010.

4. **Калиниченко, Л.А.** Методы и средства интеграции неоднородных баз данных [Текст]/Л.А. Калиниченко; Под ред. Л.Н. Королева.–М.: Наука, 1983. –424 с.

5. **Цаленко, М.Ш.** Моделирование семантики в базах данных [Текст]/М.Ш. Цаленко.–М.: Наука, 1989.–228 с.

УДК 681.3

И.В. Аникин, А.С. Потапов

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРОДУКЦИОННО-ФРЕЙМОВОЙ МОДЕЛИ

Проблема оценки и управления рисками информационной безопасности для современных информационных систем в настоящее время особенно актуальна [1]. Учет уровня рисков при проектировании комплексных систем защиты информации позволяет более точечно управлять вложениями в информационную безопасность (ИБ), строить эффективные системы защиты информации с позиции ожидаемого ущерба. В связи с этим, в информационной безопасности интерес представляет разработка специализированных методик оценки рисков ИБ.

Анализ существующих подходов к оценке рисков ИБ показывает, что основными сложностями их практической реализации являются [2]:

трудная формализация процедур оценки рисков ИБ;

необходимость формализации модели информационной системы как объекта управления рисками ИБ, а также учета человеческого фактора нарушителя;

нечеткость и качественность основных факторов риска ИБ – возможности реализации угроз ИБ и уровня ущерба;

необходимость принятия решений о выборе системы защиты информации в условиях неопределенности и неполноты информации.

При решении задачи оценки и управления рисками ИБ актуально использование таких методов искусственного интеллекта, как экспертные (ЭС) и нечеткие системы, показавшие свою эффективность при решении задач в условиях вышеперечисленных сложностей. В данной статье для решения задачи оценки рисков ИБ предлагается продукционно-фреймовая модель, а также программный комплекс в виде ЭС.

Разработка базы знаний экспертной системы оценки рисков ИБ

Задача оценки рисков ИБ трудно формализуемая, для ее решения на практике полагаются на опыт и знания экспертов. Для автоматизации оценки рисков ИБ предлагается формализовать знания экспертов и представить их базе знаний ЭС в виде продукционно-фреймовой модели с возможностью формализации нечетких знаний [3].

Формально фреймовая модель может быть представлена в виде непустого множества именованных фреймов F_i, связанных отношением наследования «:». Каждый фрейм $f \in F$ представляет собой функцию $F: I_f \to S_f$, отображающую множество идентификаторов слотов данного фрейма во множество слотов, имеющих вид $S = \langle v, d, R, D, C \rangle$, где v, d – текущее значение слота и значение слота по умолчанию, которые могут быть представлены в виде нечетких переменных; R, D – множества присоединенных процедур и процедур-демонов; C – множество ограничений на значение слота.

Для решения задачи оценки рисков ИБ разработана фреймовая модель в виде дерева фреймов, изображенного на рис. 1. Осуществление логического вывода на данной модели осуществляется с помощью правил продукций, а также формализованных присоединенных процедур и процедур-демонов. Семантика этих процедур фреймовой модели, определенная И.В. Аникиным в работах [2, 4], позволяет учесть нечеткие знания экспертов об объектах предметной области путем рассмотрения слотов фрейма в виде лингвистических переменных.

Структура экспертной системы оценки рисков ИБ

Разработанная ЭС оценки рисков ИБ «Фрейм-Менеджер» использует продукционно-фреймовое представление знаний. Применяя технологию объектно-ориентированного программирования, система фреймов хранится в виде иерархии Java классов.

ЭС имеет модульную структуру, представленную на рис. 2. Основными модулями системы являются:

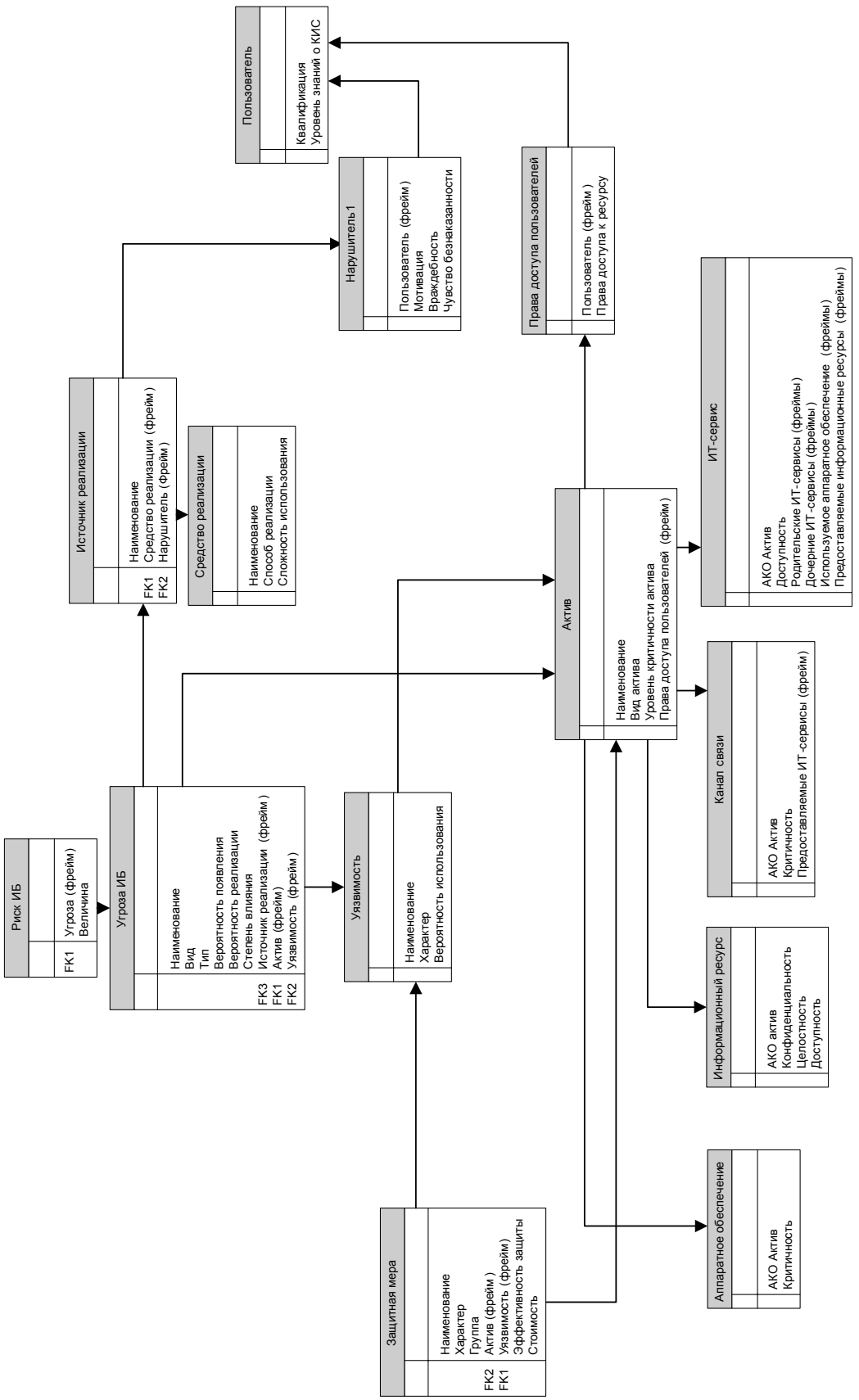


Рис. 1. Фреймовая модель для решения задачи оценки рисков ИБ

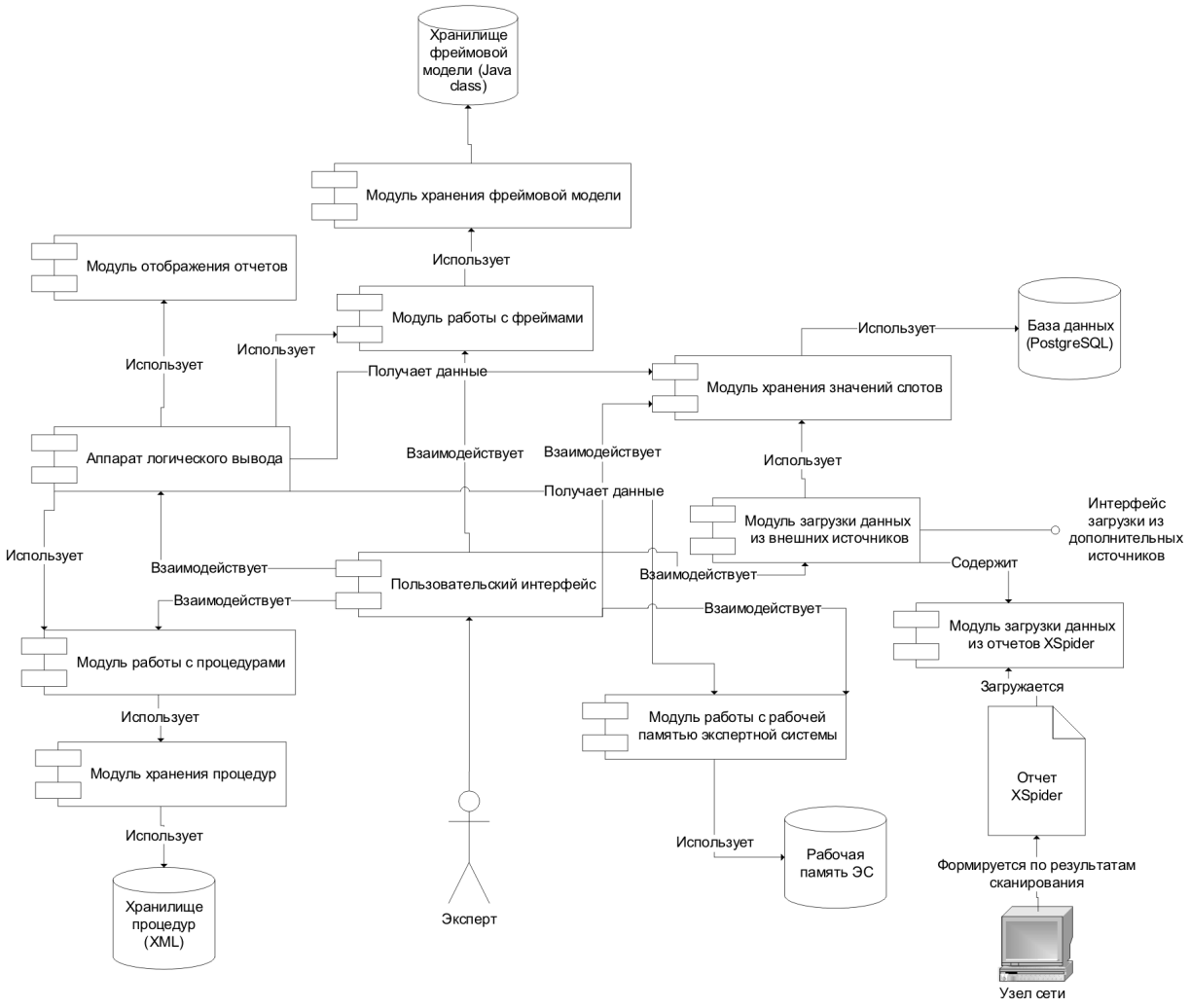


Рис. 2. Модульная структура ЭС

модуль работы с фреймами;
модуль работы с процедурами;
модуль загрузки данных из внешних источников;
модуль работы с рабочей памятью;
модуль хранения значений слотов;
аппарат логического вывода.

Модуль работы с фреймами дает возможность сформировать фреймовую модель. Модуль работы с процедурами позволяет задать процедурные знания для фреймовой модели оценки рисков ИБ в виде присоединенных процедур и процедур-демонов. Модуль загрузки данных из внешних источников имеет внешний java-интерфейс com. framemanager. ui.IDataReader, позволяющий загружать данные из разнообразных внешних источников. В разработанной ЭС реализован модуль загрузки данных об уязвимостях из отчетов сканера безопасности XSpider.

Рабочая память представляет собой хранилище рабочих переменных логического типа. Предусмотрена возможность их использования в логических выражениях при создании процедур, что дает возможность управлять продукционными знаниями и таким образом проводить оценку рисков несколькими способами на одной фреймовой модели.

Значения слотов хранятся в базе данных PostgreSQL. При реализации доступа к базе данных была использована ORM библиотека – hibernate.

Алгоритм функционирования системы состоит из следующих шагов.

Создание фреймовой модели представления данных. Модель представляет собой дерево фреймов.

Создание рабочих переменных в рабочей памяти. Выставление их значений.

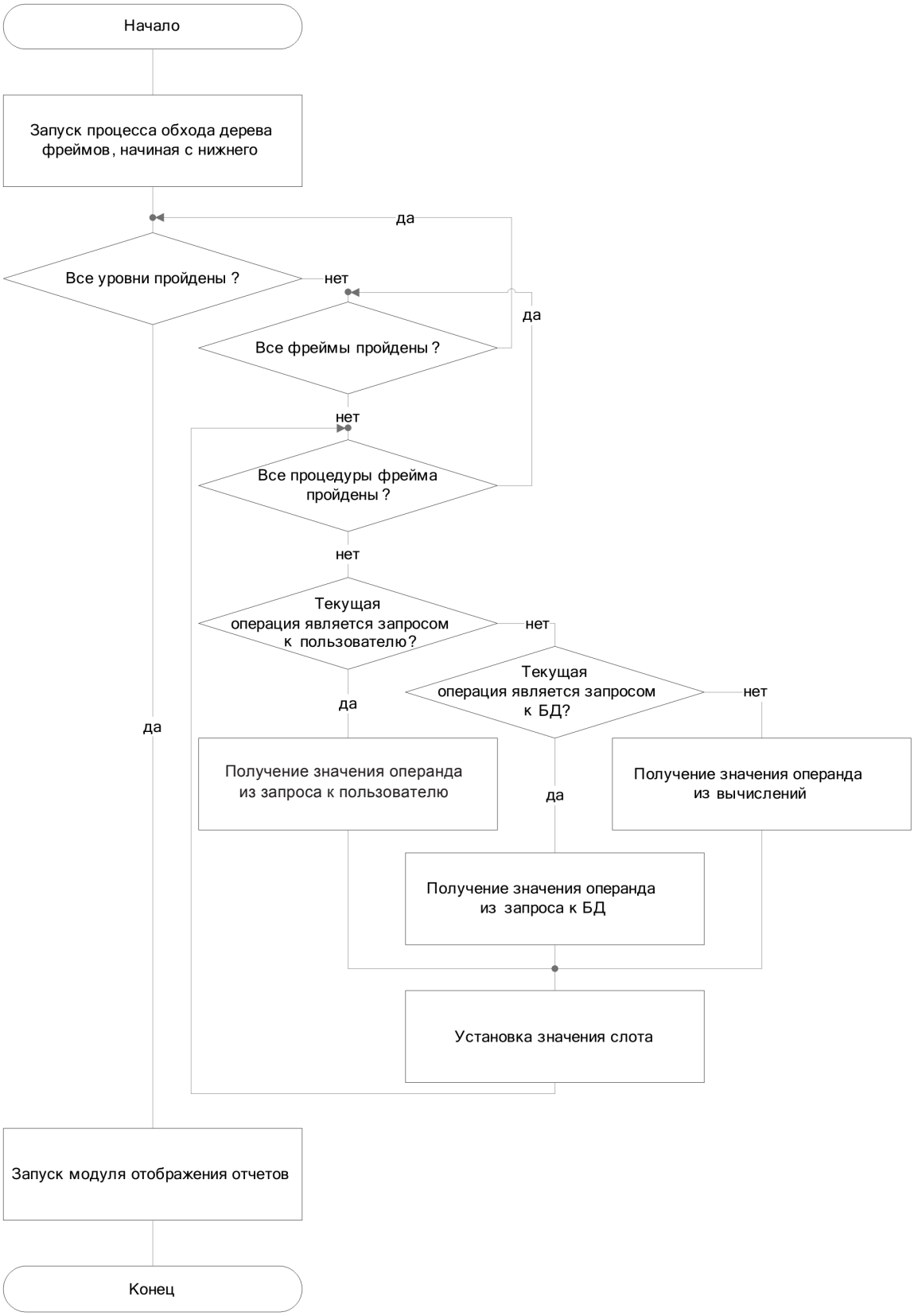


Рис. 3. Алгоритм функционирования аппарата логического вывода

Формирование процедур для фреймовой модели. На этом этапе используются сформированная на первом этапе фреймовая модель и, при необходимости, созданные рабочие переменные.

В случае, если необходимо получить данные из внешних источников, например из отчетов XSpider, вызывается модуль получения данных из внешних источников и указывается файл отчета.

Заполнение фреймовой модели значениями для конкретной системы.

Запускается аппарат логического вывода. Если были созданы процедуры, требующие для получения значений слотов запросы к пользователю или к БД, эксперту необходимо вводить таковые значения или выбирать из хранящихся в БД по мере появления запросов.

По окончании работы аппарата логического вывода появляются результаты работы системы. Эксперту необходимо оценить полученные результаты, провести их анализ и сделать соответствующие выводы.

В основе алгоритма работы аппарата логического вывода лежит алгоритм обхода дерева фреймов в глубину, начиная с нижнего уровня (рис. 3). Для каждого фрейма выполняются все определенные в нем процедуры и выставляются значения указанных в них слотов. Существует три варианта получения значения слотов: запрос к пользователю, запрос к БД, вычисление по формуле. После выполнения процедур запускается модуль формирования отчетов и выводятся результаты.

Разработанная продукционно-фреймовая модель и программный комплекс дает возможность формализовать и использовать знания эксперта по решению трудно формализуемой задачи оценки рисков информационной безопасности. Особенность фреймовой модели позволяет при решении данной задачи формализовать модель информационной системы как объекта оценки рисков ИБ, а также учесть человеческий фактор нарушителя. Использование лингвистических переменных для определения слотов фрейма помогает учесть нечеткость и качественность основных факторов риска ИБ – возможности реализации угроз ИБ и уровня ущерба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петренко, С.А.** Управление информационными рисками. Экономически оправданная безопасность [Текст]/С.А. Петренко, С.В. Симонов.–М.: Компания АйТи: ДМК Пресс, 2004.–384 с.

2. **Аникин, И.В.** Управление внутренними рисками информационной безопасности корпоративных информационных сетей [Текст]/И.В. Аникин //Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление.– 2009.–№ 3.

3. **Аникин, И.В.** Подход к управлению рисками информационной безопасности на основе продукционно-фреймовой модели представления знаний [Текст]/ И.В. Аникин, А.С. Потапов//Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Междунар. конф.–Самара: Самарский научный центр РАН, 2010.–С. 606–614.

4. **Аникин, И.В.** Метод количественной оценки уровня ущерба от реализации угроз на корпоративную информационную сеть [Текст]/И.В. Аникин//Информационные технологии.–2010.–№ 1.

УДК 004.942, 624.07;69.07;51-74

В.В. Белов, Ю.Я. Болдырев, С.В. Романов, А.С. Шанина

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Вопрос о методах расчета грунтовых оснований зданий и сооружений приобрел сегодня особенно актуальное значение. Это связано, в первую очередь, со все возрастающей сложностью возводимых сооружений. их высотой, а также увеличением количества подземных этажей. Кроме того, значительный интерес для инвесторов представляет освоение новых пространств для строительства, о чем свидетельствует бурное развитие домостроения на искусственных грунтах (заливы, побережья).

Проблематика механики грунтов имеет долгую и интересную историю, которая связывает в единый «клубок» вопросы экспериментального изучения задач в этой области, их связь с задачами корректных измерений в механике грунтов, изучение естественного состояния пород с учетом их образования и эволюции, а также создание на основе всех названных составляющих моделей грунта и технологий их расчета. Заметим, в связи со сказанным, что каждое звено цепочки требует отдельного рассмотрения. Только в рамках такой обоснованной совокупности исследований мы можем построить эффективную математическую модель грунтового основания. При этом мы считаем важным подчеркнуть, что задача составления эффективной модели грунтового основания по своей сути является глубоко междисциплинарной, связывающей задачи механики сплошных сред, которые уже обладают своей спецификой, с задачами гидравлики, теплофизики и т. д.

Начнем с того, что природное состояние грунтов – это краеугольный камень механики грунтов. Нельзя говорить о «разуплотнении» образца, моделировании природной нагрузки и т. д., если не иметь представления о природном состоянии пород (грунтов) с учетом условий образования и эволюции верхних слоев литосферы.

В большинстве научно-технических публикаций используется термин «грунт». Одним из первых термин «переуплотненный грунт» ввел К. Терцаги [1]. Однако дело тем и ограничилось. А ведь грунт в природном состоянии может быть как «переуплотненным», так и «недоуплотненным» (недоуплотненные грунты имеют место, когда вышележащая толща не давит на нижележащие слои).

Один из важнейших вопросов математического моделирования в рассматриваемой сфере – создание модели деформирования грунтов. В настоящее время существуют различные подходы к данному вопросу, при этом, в основном, все они сводятся к отражению различного рода физических факторов, характеризующих грунтовый массив: уплотнение, разуплотнение, упрочнение, пластичность, ползучесть, текучесть и др. В ряде случаев, возможно, необходима и модель, учитывающая дискретность грунта (прерывность), которую представляют в виде δ-функции Дирака. Такая модель физически связывает все названные выше свойства воедино и, вообще говоря, представляет собой шаг к более реальному описанию грунтовой среды.

Все строительные объекты возводятся на грунтовом основании (и взаимодействуют с ним) или располагаются в толще грунта. Его прочность и устойчивость определяются не только свойствами грунта, но и конструктивными особенностями сооружения.

Стоимость фундаментов может составлять существенную часть от стоимости сооружений. Поэтому в любых условиях необходимо уметь гра-

мотно проводить совместный расчет фундамента и грунтового массива, применяя современные расчетные технологии и используя для каждого конкретного случая определенную модель грунта. Одна из основных задач при проектировании строительных объектов – оценка несущей способности фундаментной конструкции сооружения, в частности, свай, и оценка осадок фундамента при расчетных нагрузках.

Современные технологии математического моделирования открывают возможности использования новых подходов для расчетов и проектирования фундаментов сооружений. Например, задача прогнозирования несущей способности свай – типичная нелинейная задача механики грунтов из-за многофакторного влияния на несущую способность физико-механических свойств грунтов и параметров свай. Натурные исследования свай весьма затратны, к тому же их проведение не всегда успевает к моменту проведения расчетов. При этом для высотных зданий требуются сваи большого сечения и часто большой длины. Испытания подобных свай могут оказаться крайне трудоемкими. Нужно учитывать и то, что в условиях строительной площадки геологические условия различны. Таким образом, создается ситуация, когда в корректно поставленную модель подставляются не очень достоверные начальные данные.

В большинстве стран несущая способность свай по грунту определяется по двухкомпонентной схеме: в зависимости от длины сваи и физико-механических свойств грунта. Большой разброс при определении несущей способности свай как теоретическими, так и экспериментальными методами (статическим и динамическим) свидетельствует о необходимости усовершенствования методов расчета свай с целью увеличения точности, экономичности и надежности проектирования.

Применение современных вычислительных технологий в области исследования поведения грунтов продемонстрируем на примере разработки методики расчета погружения сваи в грунт и анализа ее несущей способности.

Для упрощения математической постановки задачи с целью наглядной демонстрации рассматриваемых технологий рассмотрим работу отдельной сваи под вертикальной нагрузкой. Будем рассматривать задачу как осесимметричную, в которой ось симметрии рассматриваемой расчетной области совпадает с вертикальной осью симметрии сваи (рис. 1). Расчетное сечение сваи представляется условно круглым.

Рассмотрим процесс погружения сваи диаметром 420 мм и глубиной погружения 24,6 м. Предположим, что нам известны инженерно-геологические условия грунтового массива (табл.), а также данные точечных испытаний при вдавливании сваи такого типа статической нагрузкой.

В качестве основного инструмента математического моделирования были выбраны программные комплексы ANSYS (США) и PLAXIS (Голландия), обладающие достаточно широкими возможностями для моделирования подобных задач. При этом отметим, что комплекс PLAXIS ориентирован именно на математическое моделирование геотехнических процессов. Наша цель – разработка в рамках этих комплексов методики расчета свай с учетом контактного взаимодей-

Рис. 1. Схема забивания сваи и осесимметричная постановка задачи

№ слоя	w	ρ, кг/м^3	e	φ, град.	C, кПа	E, МПа	a_0, 1/МПа
1	Расчетное сопротивление $R = 0{,}08$МПа						
2	0,30	1930	0,817	11	7	6	0,17
3		1950	0,750	25	1	10	0,08
4		1980	0,700	33	1	25	0,03
5	0,25	2010	0,675	12	7	6,5	0,15
6	0,29	1950	0,793	9	5	6	0,18
7	0,38	1840	1,050	9	8	5	0,20
8	0,30	1940	0,822	11	9	7	0,14
9	0,16	2170	0,434	14	14	10	0,10
10	0,17	2150	0,464	21	21	13	0,08
11	0,14	2190	0,403	28	39	25	
12	0,10	2270	0,297	33	85	37	
13	0,22	2050	0,625	24	48	22	
14	0,18	2140	0,501	24	114	30	
15	0,16	2150	0,468	29	165	37	

ствия с разными слоями грунтов и проведение сравнения известных экспериментальных результатов с результатами моделирования. Далее разработанная методика, верифицированная по экспериментальным данным, может быть использована для расчета свайных полей.

Подчеркнем, что рассматриваемая постановка задачи касается только одной сваи, поскольку известно, что свайное поле или куст имеют отличное от одиночной сваи поведение [4]. Таким образом, рассмотрение задачи для нескольких свай требует отдельной постановки задачи и решение такой задачи – дело ближайшего будущего.

Обозначения, приведенные в таблице: ИГЭ – номер слоя грунта; w – природная влажность; ρ – плотность; e – коэффициент пористости; φ – угол внутреннего трения; C – удельное сцепление; E – модуль деформации; a_0 – коэффициент сжимаемости. В таблице принято следующее описание слоев грунта:

1 – насыпные грунты;

2 – супеси песчанистые с редкими растительными остатками, текучие;

3 – пески пылеватые, серые, средней плотности, насыщенные водой;

4 – пески средней крупности, серые, средней плотности, насыщенные водой;

5 – супеси песчанистые, серые, пластичные;

6 – суглинки легкие, пылеватые, коричневые с утолщенными прослоями песка, текучие;

7 – суглинки тяжелые, пылеватые, коричневые, текучие;

8 – суглинки легкие, пылеватые, серые, текучие;

9, 10 – супеси пылеватые, пластичные, серые с гравием и с галькой;

11 – супеси пылеватые, твердые, серые с гравием и с галькой;

12 – супеси пылеватые, твердые, серые с галькой и с гнездами песка с валунами;

13 – суглинки пылеватые, голубовато-серые, обогащенные глинистым материалом с обломками песчаника с редким гравием, твердые;

14 – глины пылеватые, голубовато-зеленые, дислоцированные с обломками песчаника, твердые;

15 – глины пылеватые, голубовато-зеленые, слоистые, твердые.

На рис. 2 приведено описание геологического разреза грунтового массива. Расчетная область слева ограничена линией, проходящей через ось

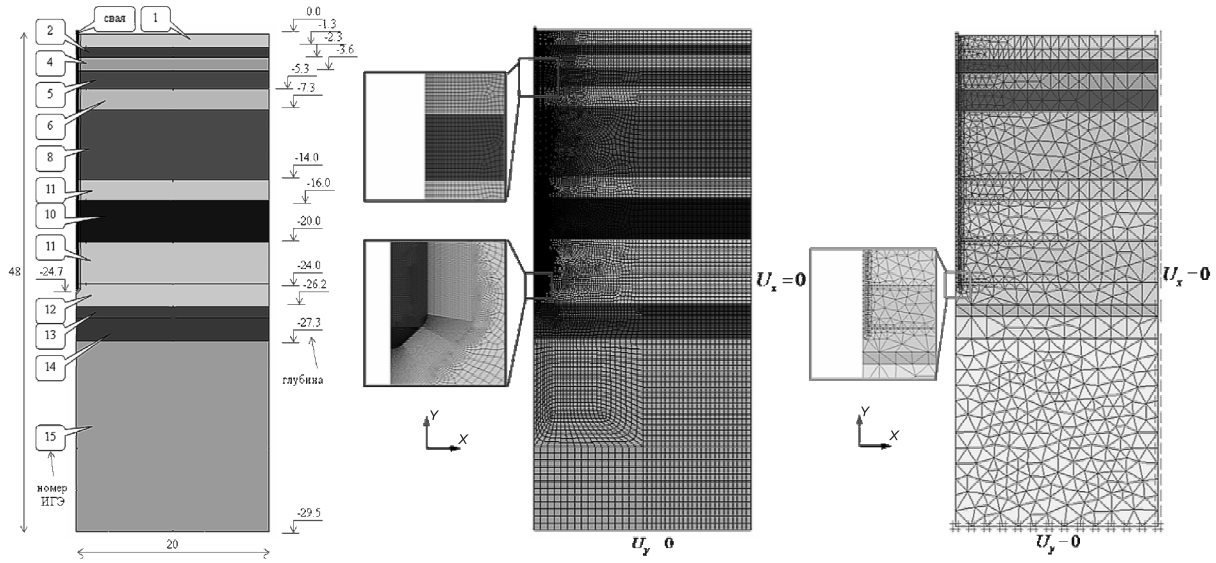


Рис. 2. Геологический разрез и конечно-элементные области, разработанные в средах ANSYS (слева) и PLAXIS (справа), а также граничные условия для перемещений U_x и U_y

симметрии сваи. Крайняя правая граница выбрана таким образом, чтобы она не оказывала значительного влияния на результаты решения в интересующей нас области. В связи с отсутствием данных ниже отметки – 48 м относительно уровня земли, предполагалось, что ниже залегает мощный твердый слой грунта, поэтому по нижней границе считалось отсутствие вертикальных перемещений.

Природное напряженное состояние грунтового массива моделируется нагружением расчетной области на первом шаге решения собственным весом грунта. На следующих шагах конечным элементам, занимающим объем сваи, задаются свойства бетона. К верхнему обрезу сваи прикладывается вертикальная сила величиной *N*.

Свойства бетона приняты:

E = 20 ГПа; ν = 0,2; C = 5 МПа; φ = 35; γ = 24,525 кН/м^2

Сеточные области, разработанные в комплексах ANSYS и PLAXIS, а также граничные условия для перемещений U_x и U_y представлены на рис. 2. При решении задачи на основе ANSYS использовались упругая и упруго-пластическая модель Друккера–Прагера [1, 2], при этом на границе между сваей и грунтом моделировалось контактное взаимодействие. При решении задачи в комплексе PLAXIS использовалась модель Мора–Кулона [1, 2] и 15-узловые конечные элементы. Контактное взаимодействие моделировалось введением интерфейс-слоя с пониженными прочностными свойствами, зависящими непосредственно от каждого слоя грунта.

Результаты расчетов деформации сваи и ее несущей способности в ANSYS представлены на рис. 3. Несущая способность сваи составила 225 т.

Методика, разработанная на основе использования комплекса ANSYS, позволяет учитывать:

контактное взаимодействие сваи с грунтом при различных коэффициентах трения;

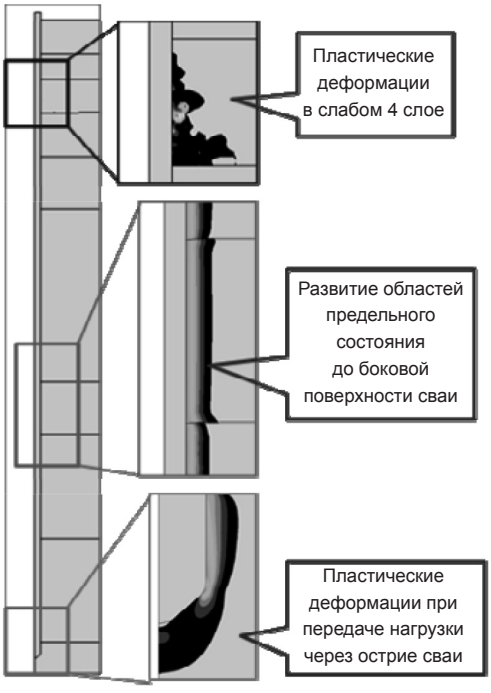


Рис. 3. Зоны пластических деформаций

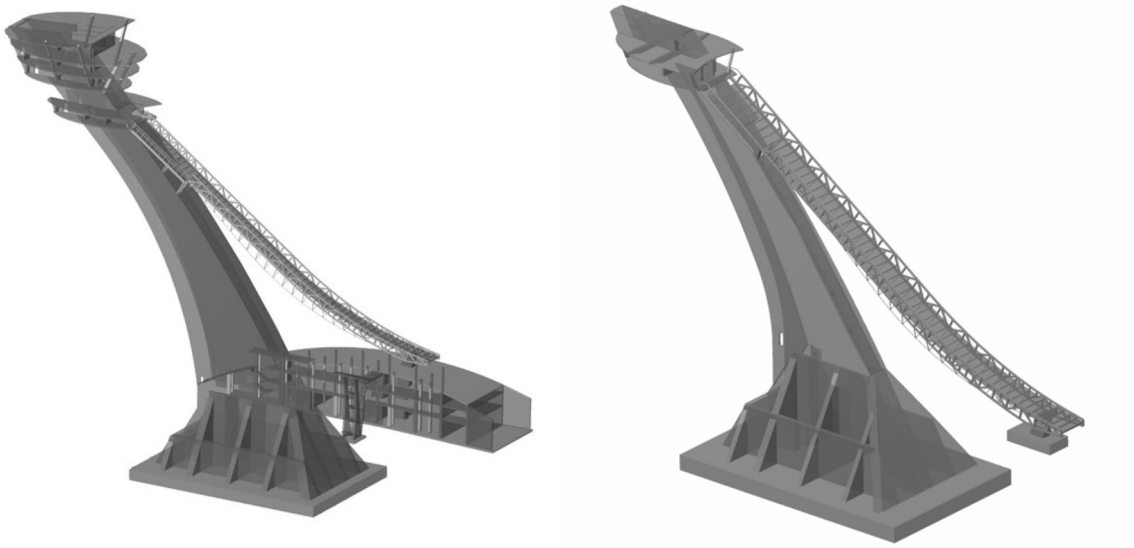


Рис. 4. Спортивные трамплины HS 140 (слева) и HS 106 (справа)

давление в грунте, возрастающее с глубиной (существенно упрочняющее грунт);

боковое уплотнение грунта вблизи сваи, возникающее от бурения или вдавливания;

влияние грунтовых вод;

реальное распределение слоев грунта;

нелинейное поведение грунтов, переход в пластичное состояние.

Рассмотрим еще одну из проблем проектирования зданий и сооружений: проблему учета взаимодействия сооружения с основанием и оценку осадки грунта в нелинейной постановке. Для

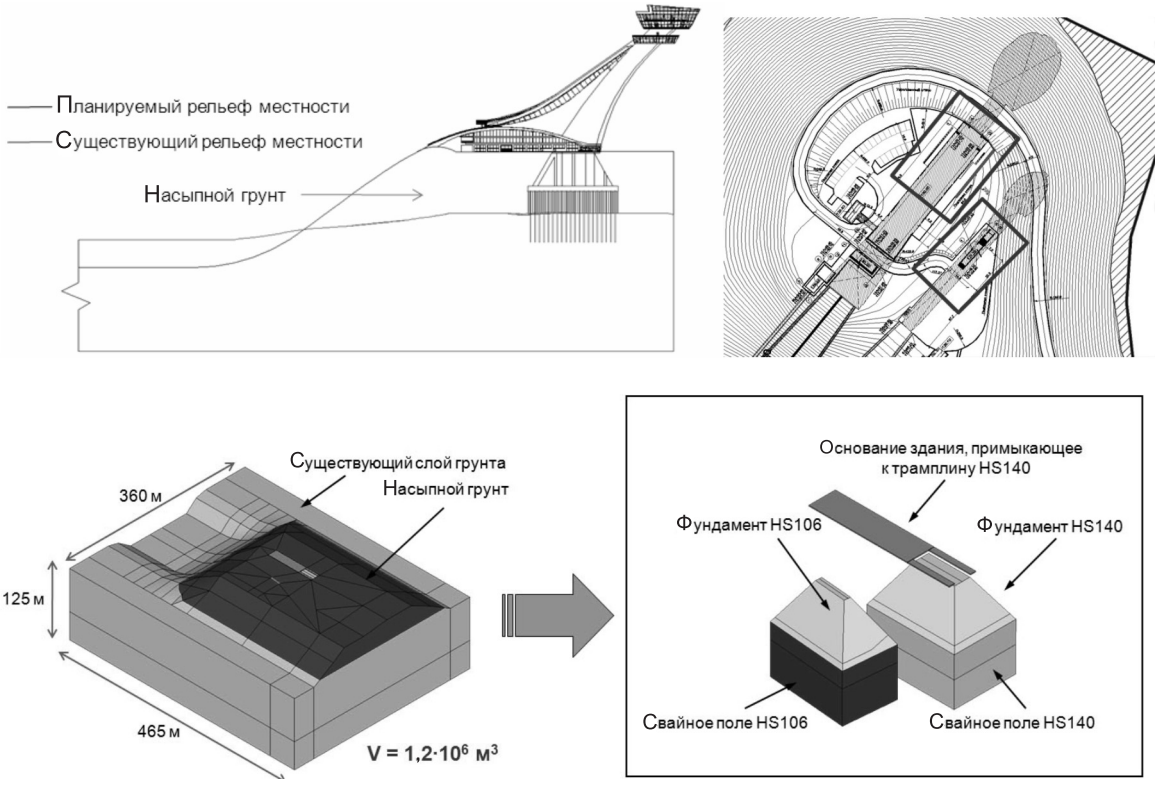


Рис. 5. Схема насыпного массива, расположения трамплинов и пространственная модель грунтового массива

демонстрации разрабатываемых нами подходов взят расчет грунтового массива по несущей способности и по деформациям в районе строительства трамплинов HS 140 и HS 106 многофункционального спортивного комплекса «Токсово» (рис. 4) [3].

Трамплин HS 140 представляет собой вертикально-наклонную изогнутую конструкцию высотой 90 м (над уровнем земли). Габариты основания трамплина вместе с примыкающим зданием составляют 88 х 11,8 м. В основании конструкции находится 3-этажное строение спортивного назначения, представляющее собой железобетонное каркасное здание, являющееся нижней опорой для разгонной металлической фермы трамплина.

Трамплин HS 106 представляет собой вертикально-наклонную изогнутую конструкцию высотой 55 м. Габариты основания трамплина составляют 24 х 2,7 м.

Оба трамплина рассматривались как высотные сооружения и, в соответствии с ТСН 31-332-2006 Санкт-Петербург, относятся к I уровню ответственности, а в соответствии с ТСН 50-302-2004 Санкт-Петербург, – к третьей геотехнической категории сложности.

По данным геологических изысканий в районе предполагаемого строительства трамплинов грунтовое основание сложено с участием 14 различных слоев. Возведение каждого трамплина планируется на насыпном холме для оптимального формирования зоны приземления спортсменов (рис. 5).

Основные проблемы расчета грунтового массива под трамплинами HS 140 и HS 106:

взаимное влияние двух трамплинов друг на друга (расстояние между фундаментами составляет 3 м);

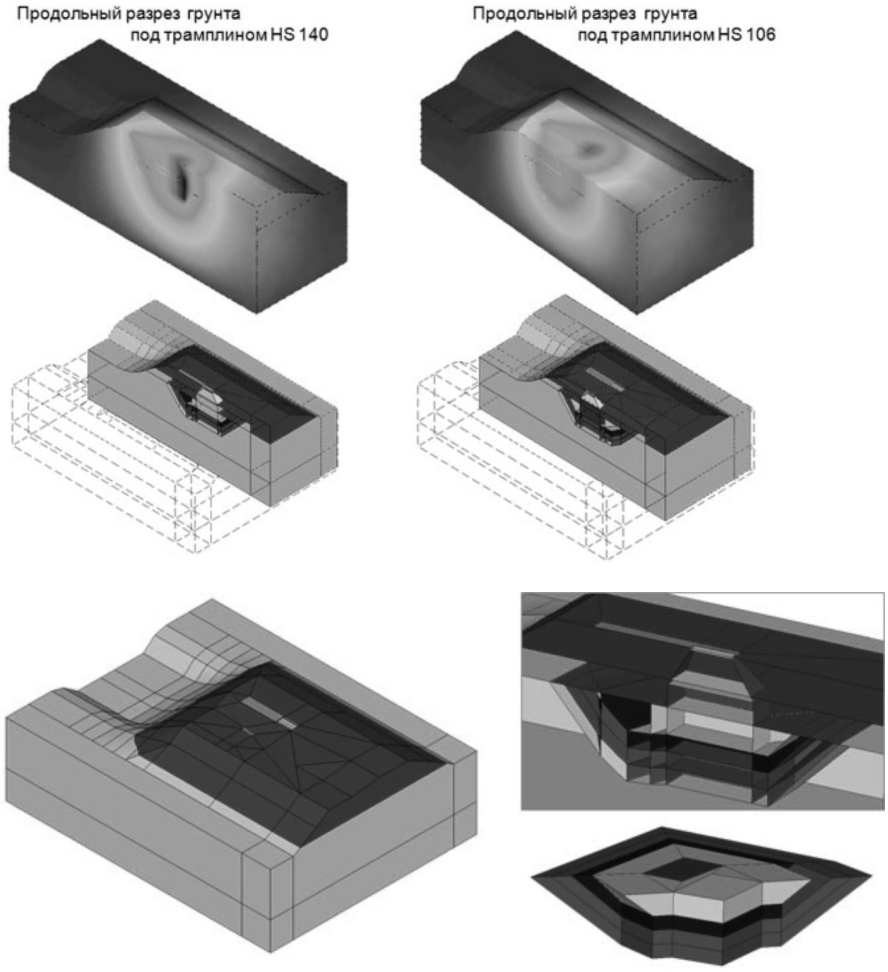


Рис. 6. Слои грунтовой подушки и поле перемещений грунтового массива

нелинейное поведение грунтов, а также грунтовых вод;

совместная работа трамплинов и грунтового массива;

учет работы свайного поля под фундаментами трамплинов.

Для корректного учета всех вышеперечисленных факторов на основе комплекса ANSYS была разработана пространственная модель грунтового массива размерами 465x360x125 м (рис. 5), включающая в себя свайные основания сооружений.

Механические свойства свайных оснований были выбраны путем осреднения свойств бетона и грунта пропорционально объемным характеристикам. Для моделирования материала грунта принята модель Друкера–Прагера. Свойства материала фундаментов трамплинов приняты линейными. На фундаменты трамплинов приложены усилия от надземной части сооружений.

В результате расчетов определено пространственное нелинейное напряженно-деформированное состояние грунтового массива с учетом совместной работы с фундаментами и свайными полями. Кроме того, проведено исследование влияние свойств так называемой «грунтовой подушки», формируемой на этапе фундаментных работ, на осадку трамплинов (рис. 6). Поля перемещения грунтового массива под трамплином HS 140 имеют явно выраженную неравномерность. Осадки всех сооружений находятся в пределах допустимых значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Терцаги, К.** Механика грунтов в инженерной практике [Текст]/К. Терцаги, Р. Пек.–М., 1958. –С. 607.

2. **Ухов, С.Б.** Механика грунтов, основания и фундаменты: Учебник [Текст]/С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский [и др.]. –М.: АСВ, 1994.–С. 527.

3. **Болдырев, Ю.Я.** Современные технологии математического моделирования для инженерного анализа и проектирования в строительстве [Текст]/ Ю.Я. Болдырев, Д.А. Климшин, А.С. Шанина [и др.]// Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2010.–№4 (103).–С. 106–112.

4. **Далматов, Б.И.** Проектирование фундаментов зданий и подземных сооружений: Учеб. пособ. [Текст]/Б.И. Далматов, В.Н. Бронин, А.В. Голли [и др.]; Под ред. Б.И. Далматова; 3-е изд. –М.: АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 2006.–428 с.

УДК 004.942, 681.586;681.335.2

В.В. Белов, Ю.Я. Болдырев, Д.В. Климшин, С.В. Романов

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УНИКАЛЬНЫЕ ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Ветровые воздействия на высотные здания являются, по своему существу, основными динамическими нагрузками в условиях платформенных территорий и в районах со слабой сейсмичностью. Так, например, в московском регионе ветровые нагрузки на сооружения выше 75 м могут превосходить проектное 5-балльное воздействие, создаваемое землетрясениями из зоны Вранча в Румынии [1]. Немаловажно и то обстоятельство, что ветер, в отличие от сейсмических событий, действует постоянно. Это влияет как на комфортность обитания людей, так и на физико-химические процессы (в т. ч. и усталостные) в конструкциях и грунтах оснований зданий.

При проектировании высотных зданий и сооружений одна из важных задач – получение детальной картины обтекания их ветром. В большинстве случаев корректное решение задач аэродинамики таких объектов требует использования суперкомпьютеров, поскольку решение

невозможно без значительных вычислительных ресурсов, позволяющих наиболее полно учесть все многообразие факторов, влияющих на распределение ветровых потоков вблизи рассматриваемого сооружения. В мировой практике известны случаи, когда недостаточный учет ветровой нагрузки на здание (а именно ее пульсационной составляющей) приводил не только к серьезным шумовым проблемам в угловых помещениях, но и к вибрациям, существенно превышающим нормативные требования.

К сожалению, на сегодняшний день решение задач аэродинамики при проектировании в сфере отечественного строительства находится на весьма невысоком уровне. Это объясняется тем, что в проектных организациях отсутствует как необходимая суперкомпьютерная база, так и интеллектуальная составляющая в виде специалистов, способных решать подобные проблемы. Широко применяются простейшие подходы к расчету ветрового давления, описанные в СНиП, а также множественные и дорогостоящие эксперименты в аэродинамических трубах по моделированию ветрового потока на большой высоте и измерению его воздействия на здания и сооружения.

Между тем, все возрастающая этажность зданий и усложняющаяся форма и структура фасадов заставляют проектные компании искать новые методы расчета аэродинамических нагрузок. Мировой опыт показывает, что современные технологии математического моделирования с использованием суперкомпьютеров позволяют существенно сократить количество испытаний в аэродинамических трубах и в перспективе вообще отказаться от них. При этом такие подходы помогают эффективно выявлять и анализировать разнообразные вопросы вибрационного и шумового воздействия ветрового потока в зонах углов здания и выступающих элементов.

Математическое моделирование также позволяет определять наилучшие формы, размеры, ориентацию здания и его отдельных элементов, исходя из минимизации отрицательного воздействия наружных климатических условий на энергетический баланс здания. При этом может быть проведена комплексная оценка влияния сооружений на окружающую застройку. По опыту возведения зданий за рубежом известно, что высотные объекты могут существенно изменить скорость и направление ветровых потоков у своего основания, существенно ухудшить комфортность пребывания людей (сквозняки, пыль, шум). Особенно сильно влияние на скорость и направление ветров группы из нескольких высотных зданий.

В качестве характерного примера применения методов вычислительной аэродинамики при проектировании зданий и сооружений рассмотрим задачу о ветровом воздействии на трамплины многофункционального спортивного комплекса «Токсово», находящегося в данный момент в стадии проектировании [2].

Задача связана с определением величин ветрового давления и аэродинамических коэффициентов сооружений, которые определим ниже.

Перейдем к описанию используемых моделей обтекания. Начнем с того очевидного фактора, что аэродинамические характеристики зданий и сооружений связаны с их индивидуальными особенностями и существенно зависят от их геометрических форм и размеров, от характера и структуры набегающего потока, от окружающей застройки и от некоторых других факторов. Как правило, эти силы связывают с безразмерными аэродинамическими коэффициентами, определяющими аэродинамические силы и моменты, действующие на тело, движущееся в жидкой или газообразной среде. В нашем случае мы можем ограничиться одним коэффициентом C_R аэродинамической силы R, величина которого находится по следующей формуле:

$$C_R = R/(\frac{1}{2}\,\rho U^2 S), \qquad (1)$$

где ρ – плотность воздуха; U – характерная скорость воздушного потока; S – характерная площадь обдуваемого сооружения.

Прежде всего необходимо установить характерные значения для важнейших аэродинамических параметров подобия, характеризующих рассматриваемый класс задач. В нашем случае это числа Маха и Рейнольдса, определяемые следующим образом [3]:

$$M = U/a, \quad \mathrm{Re} = \frac{UL}{\nu}, \qquad (2)$$

где a – скорость звука; L – характерный размер здания или сооружения; ν – кинематическая вязкость воздуха. В рассматриваемых нами задачах величина числа Маха всегда удовлетворяет соотношению $M<<1$, т. е. движение воздуха существенно дозвуковое, а значит, сжимаемостью воздуха мы можем пренебречь. В то же время диапазон чисел Рейнольдса колеблется, как правило, от нескольких сотен до нескольких тысяч,

что приводит к необходимости решения задач аэродинамики как задач турбулентного течения, со всеми вытекающими отсюда проблемами.

Основными математическими соотношениями, описывающими турбулентное течение несжимаемого газа, являются уравнения Навье–Стокса [3], в состав которых входят уравнение неразрывности и уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

где u_j – (j = 1, 2, 3) компоненты вектора скорости; p и ρ – давление и плотность воздуха соответственно; τ_{ij} – тензор напряжений для Ньютоновской жидкости

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}, (j, i = 1, 2, 3), (k = 1, 2, 3), \quad (5)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха; S_{ji} – тензор скоростей деформаций

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right). \quad (6)$$

Крайне трудным и серьезным препятствием при решении инженерных задач аэрогидродинамики является турбулентный характер течения, имеющий место в подавляющем большинстве таких задач. Причина этих трудностей в том, что в турбулентном потоке спектр пространственных и временных флуктуаций полей скоростей, давлений и т. д. очень широк. Это делает исключительно трудным или даже невозможным численное определение всего спектра масштабов (вихревых пульсационных структур) при решении инженерных задач. По этим причинам при моделировании турбулентных течений, как правило, выбирается одна из трех стратегий моделирования, приведенных ниже [4].

Во-первых, это прямое численное моделирование. В этом случае уравнения Навье–Стокса (3–6) решаются численно без осреднения пульсирующих величин и моделирования турбулентных параметров. Очевидно, что в этом случае расчетная сетка и шаги по времени должны быть достаточно малыми, чтобы «уловить» все, включая самые мелкие масштабы турбулентных пульсаций. Это требует очень больших вычислительных мощностей и, вообще говоря, применимо к течениям в областях с относительно простой геометрией.

Во-вторых, это подходы, связанные с так называемым *методом моделирования крупных вихрей* (LES – метод, Large Eddy Simulation). Эта модель основана на выявлении длинноволновой части спектра пульсаций. Она эффективно применяется в задачах прикладной аэрогидродинамики.

В-третьих, это подход, основанный на численном решении исходных уравнений, осреднённых по всему спектру. Этот подход связывают с именем О. Рейнольдса (RANS – метод, Reynolds-Averaged Navier-Stokes). В результате решения осредненных уравнений получают поля средних величин (скорость, давление и т. д.). Важным обстоятельством, которое здесь присутствует, является необходимость моделирования корреляций флуктуирующих величин.

Не имея возможности детально останавливаться на используемых технологиях, укажем только то, что при расчетах мы применяли RANS – метод осреднения исходных уравнений по всему спектру. При этом для расчета турбулентных характеристик течения использовали k-ε модель [4].

Следующий весьма важный этап реализации рассмотренных математических моделей – модель турбулентного течения воздуха – построение собственно вычислительных процедур. Наиболее рациональный для этого путь – использование современных программных сред. Нами в качестве такой среды была взята среда ANSYS Workbench 2.0, в которую, в частности, интегрированы инструменты прикладной аэрогидродинамики в виде программных комплексов CFX и Fluent (хотя и в несколько усеченном виде). В настоящей работе мы использовали в качестве основного инструмента комплекс CFX, в котором реализованы рассмотренные выше модели.

Возвращаясь к проектируемым сооружениям, следует отметить, что они относятся к числу нестандартных уникальных объектов (рис. 1).

Благодаря использованию естественной высоты, проект трамплинов для прыжков характеризуется наилучшей встраиваемостью в рельеф существующей местности, что позволяет свести к минимуму необходимость искусственного подъема и обеспечить наилучшую доступность к объекту.

Наиболее сложным и характерным объектом многофункционального спортивного комплекса «Токсово» является лыжный трамплин HS 140, представляющий собой современную конструкцию. Приведем основные показатели этого сооружения:

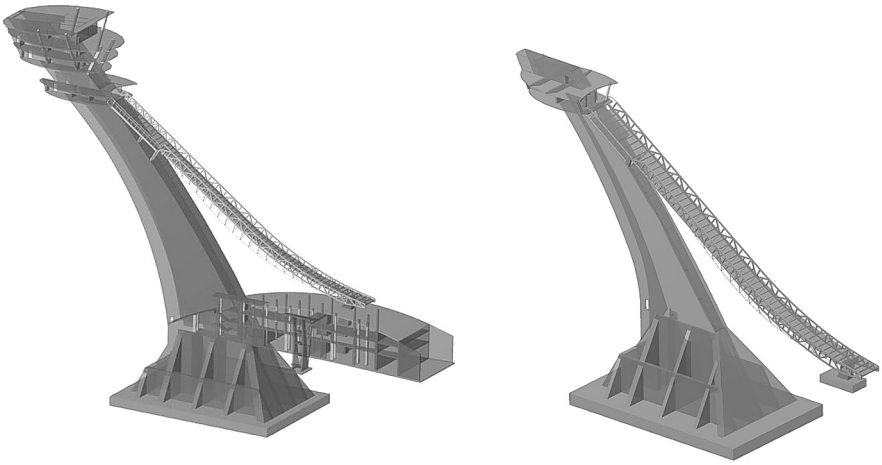


Рис. 1. Пространственные модели трамплинов HS 140 (слева) и HS 106 (справа)

высота над уровнем моря – 130,8 м (наземный этаж);

размер фундаментной плиты – 37 × 55 м;

высота трамплинной вышки – 85 м.

Одной из важных задач при проектировании данных спортивных сооружений являлось исследование характера обтекания, а также экспертные расчеты аэродинамических характеристик конструкции трамплина, установленного на плоскости земли.

Расчеты проводились на основе численного решения трехмерных уравнений аэродинамики (2–5) с учетом турбулентности внешнего ветрового потока на основе модели k-ε. В качестве входных данных в расчеты закладывался логарифмический профиль скорости ветра в приземном слое атмосферы, определяемый в соответствии с нормативными и расчетными ветровыми нагрузками, рассчитанными по СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» для II ветрового района (Санкт-Петербург) и типа местности «А».

Расчеты проведены для значений скорости набегающего ветрового потока на высотах от 10 до 100 м от земли, соответствующих логарифмическим профилям, построенным для нормативного значения ветрового давления (60 кгс/м^2 на высоте 100 м при скорости ветра 31,6 м/с). Заметим что для этих значений величины числа Маха и Рейнольдса, выражаемые формулами (2), составляют, соответственно

$$M \cong 0{,}1 \qquad Re = 31{,}6 \;\; 85{,}0/(5{,}1 \times 10^{-4}) \cong 5{,}2 \times 10^{6},$$

что подтверждает важнейшее для моделирования заключение о том, что обтекание рассматриваемых сооружений турбулентное и существенно дозвуковое, а значит, приведенные выше модели могут быть использованы.

С тем чтобы максимально корректно рассмотреть задачу об обтекании сооружений, размеры расчетной области, в которой проводился анализ, были выбраны следующими: 800 × 800 ×150 м (рис. 2). Такой значительный размер расчетной области обеспечивает, как было экспериментально установлено, получение качественной картины ветровых потоков и исключение влияния граничных условий на результат. Кроме зданий трамплинов в расчетную модель был включен и стадион, находящийся в нижней части сооружения. В данной области была построена конечно-элементная сетка на основе тетраэдрических элементов с их общим числом 1 647 515. На поверхности трамплинов характерные размеры сетки были выбраны примерно в пять раз меньшими, чем в остальной области.

Переходя к собственно аэродинамической задаче, начнем с того, что пульсационная составляющая ветровой нагрузки (50 кг/м^2 на высоте 100 м) в аэродинамический расчет не закладывалась. Данная составляющая суммировалась в соответствии с п. 6.2 СНиП 2.01.07-85 со средней составляющей скорости (определяемой в результате данного расчета) и посредством учета коэффициента надежности по ветровой нагрузке прикладывалась к конструкции в статическом расчете, где проводился подбор армирования бетонных элементов.

Расчеты проводились для худшего варианта воздействия ветрового давления на конструкцию –

Рис. 2. Трехмерная расчетная область
(область основания 800 × 800 м, по вертикали (высота области) – 150 м).

бокового. Ветровое давление в остальных вариантах (справа и слева) оценено напрямую по СНиП 2.01.07-85, т. к. воспринимающая его поверхность обладает гораздо более простой геометрией.

Поле ветрового давления, определенное в результате расчета, представлено на рис. 3. Максимальное положительное давление составляет 67 кг/м^2 и приложено к верхней части трамплина HS 140. Максимальное отрицательное давление составляет –112 кг/м^2 и наблюдается на крыше трамплина HS 140.

По результатам расчетов видно, что в зоне расположения стадиона серьезных ветровых давлений не наблюдается, что позволяет сделать предположение о комфортном нахождении там людей. Вместе с тем наблюдаются зоны с повышенным отрицательным ветровым давлением (зоны разряжения), что должно быть учтено при проектировании ограждающих конструкций трамплина (рис. 4).

Аэродинамический коэффициент C_R (1), вычисленный для каждой из поверхностей, представлен на рис. 5 в виде отношения полученной и нормативной нагрузок.

После определения значений аэродинамического коэффициента и ветрового давления, полученные значения давления были сложены с пульсационной составляющей и учтены в статическом анализе поведения всего комплекса.

Также в результате исследований определены зоны возмущения ветрового потока за трамплинами (рис. 6). Отчетливо видно, что наблюдается взаимное влияние малого трамплина на большой трамплин при данном направлении ветра. Таким образом, возможно направление действия ветра, при котором один трамплин полностью попадет в вихревую зону второго, что представляет опасность, т. к. может вызвать колебания сооружения.

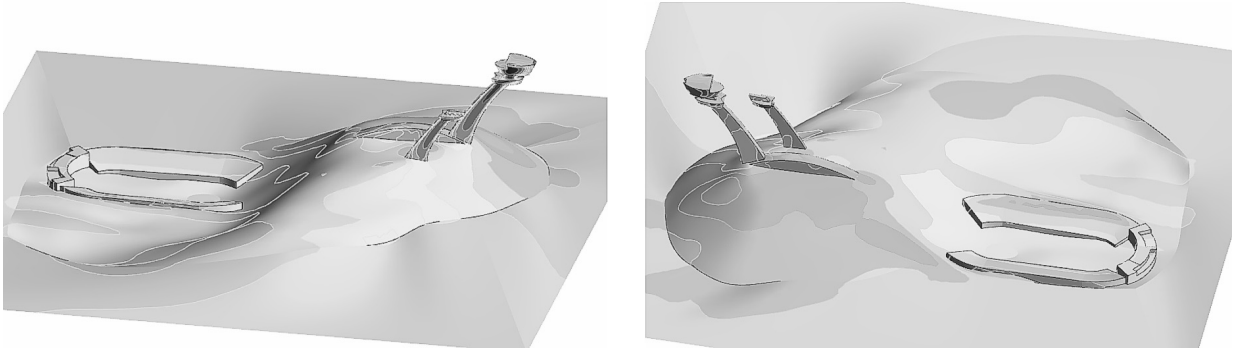


Рис. 3. Глобальное распределение поля ветрового давления

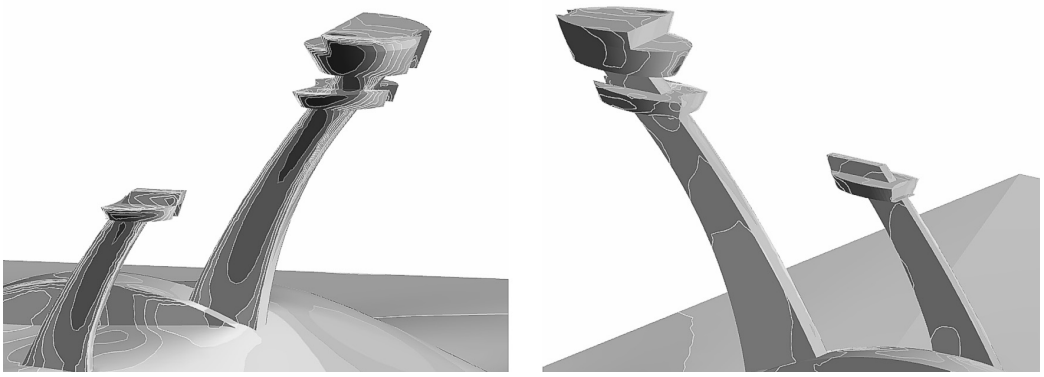


Рис. 4. Поля ветрового давления на конструкцию трамплинов

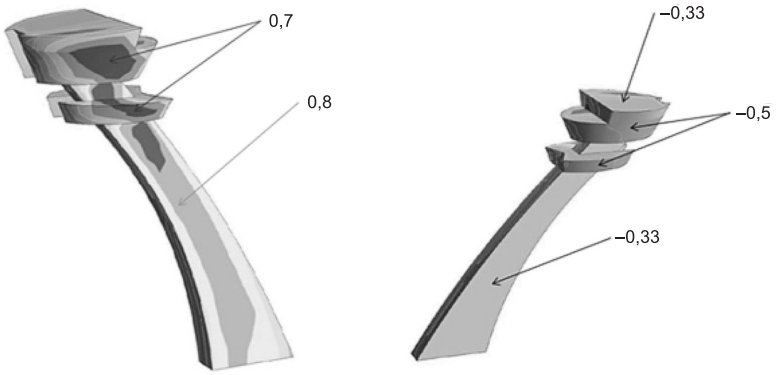


Рис. 5. Величины отнесенных значений аэродинамического коэффициента C_R на отдельных поверхностях

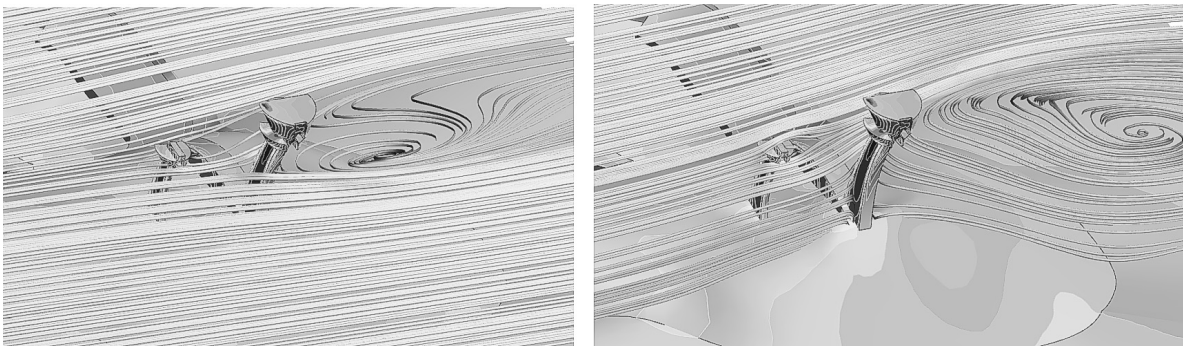


Рис. 6. Зоны возмущения ветрового потока за трамплинами

В заключение следует отметить, что современные программные комплексы предоставляют очень широкие возможности для моделирования междисциплинарных задач инженерного анализа и проектирования в сфере строительства. Чтобы показать эффективность программных комплексов и их возможности, упомянем только то, что комплексы ANSYS CFX и ANSYS Fluent [5, 6] как используемые отдельно, так и в составе среды ANSYS Workbench 2.0 предоставляют множество современных моделей турбулентности, горения и др.

Применение подобных комплексов позволяет решать задачи обтекания ветровым потоком уникальных зданий и сооружений, определять значения ветрового давления на стены и элементы фасадов, анализировать и предотвращать возникновение опасных колебательных явлений в зданиях и сооружениях, а также рассчитывать системы вентиляции и дымоудаления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современное высотное строительство: Монография.–М.: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2007.–440 с.

2. **Болдырев, Ю.Я.** Современные технологии математического моделирования для инженерного анализа и проектирования в строительстве [Текст]/Ю.Я. Болдырев, Д.А. Климшин, А.С. Шанина [и др.]//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2010.–№ 4(103).–С. 106–112

3. **Лойцянский, Л.Г.** Механика жидкости и газа [Текст]/Л.Г. Лойцянский.–М.: Наука, 1987.–840 с.

4. **Снегирев, А.Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений [Текст]/А.Ю. Снегирев. –СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2009.–143 с.

5. ANSYS CFX Documentation [Электронный ресурс]/Release 11.0, 2007.

6. ANSYS Fluent Documentation [Электронный ресурс]/Release 6.3, 2007.

УДК 51-77

А.Н. Гетман, О.Е. Кудрявцев

ОЦЕНКА ФИНАНСОВОГО РИСКА ПОЛУЧЕНИЯ ТАМОЖЕННЫХ ПЛАТЕЖЕЙ

Согласно Киотской конвенции [9], в основе проведения таможенного контроля лежит принцип выборочности, а при выборе форм таможенного контроля используется система управления *таможенными рисками*.

Существующее определение *таможенного риска* как «вероятности нарушения таможенного законодательства» [4] не охватывает весь круг задач, стоящих перед таможенным ведомством в области управления рисками. В частности, это определение не учитывает финансовые риски, связанные с таможенной деятельностью.

Напомним, что под финансовым риском обычно понимают *неопределенность исхода каждой конкретной финансовой операции.* В первую очередь финансовые риски в таможенной сфере возникают в связи с неопределенностью получения таможенных платежей, поскольку заранее невозможно предугадать их размер. Вместе с тем, перед таможенными управлениями ставятся плановые задания по таможенным платежам.

Таким образом, развитие системы управления финансовыми рисками, связанными с таможенной деятельностью, является одним из приоритетных направлений для российской таможенной службы.

Цель данной статьи – разработка методики оценки финансовых рисков, связанных с фискальной функцией таможенных органов. Получение таможенных платежей ниже планового задания можно интерпретировать как известный в теории финансовых рисков *риск разорения*. Предлагаемый алгоритм будет основываться на оценке функции распределения индекса таможенных платежей.

Риск как вероятность: предварительные математические сведения

Количественная оценка риска финансовой операции возможна только при известной вероятности исходов операции (будущих состояний рынка). На практике исследователь может обладать только статистикой тех или иных исходов аналогичной финансовой операции. На основе статистических данных можно получить статистические оценки вероятностей будущих состояний среды. Напомним некоторые факты из теории вероятностей.

Каждому случайному событию A можно поставить в соответствие определенное число – его *вероятность* $P(A)$. По определению, $0 \le P(A) \le 1$, причем вероятность невозможного события равна нулю, вероятность достоверного события равна единице.

Если известна статистика появления события A в результате выборочного наблюдения, то веро-

ятность $P(A)$ можно оценить по формуле:

$$P(A) = \frac{m}{n}, \qquad (1)$$

где m – количество наблюдений, в результате которых событие A произошло; n – общее количество наблюдений.

Суммой $A+B$ случайных событий A и B называется событие, которое состоит в том, что наступит событие A или событие B или оба одновременно.

Случайные события *несовместны*, если они не могут произойти одновременно, в противном случае они называются *совместными*.

Если A и B несовместны, то

$$P(A+B) = P(A) + P(B). \qquad (2)$$

В практической деятельности мы часто сталкиваемся с неопределенностью будущих числовых значений различных показателей (например, объема стоимостных платежей). В математике моделью для таких показателей могут служить случайные величины. Напомним основные факты и определения по этому вопросу.

Случайная величина – это любая переменная, значения которой зависят от случайных причин. Различают *дискретные* и *непрерывные* случайные величины.

Дискретная случайная величина может принимать значения только из некоторого определенного конечного или счетного множества значений (иначе говоря, все возможные значения дискретной случайной величины можно пересчитать).

Случайная величина определяется своим распределением. *Функцией распределения* случайной величины X называют функцию $F(x)=P(X<x)$.

Для дискретной случайной величины обычно строят ее *распределение* – таблицу всех возможных значений случайной величины x_i с указанием вероятностей появления этих значений p_i.

Значения X	x_1	x_2	…	x_n
Вероятность P	p_1	p_2	…	p_n

Тогда вероятность того, что случайная величина примет значение в интервале между α и β равна сумме вероятностей тех значений случайной величины, которые попадают в этот интервал (2).

Важнейшая характеристика случайной величины – ее математическое ожидание.

Математическое ожидание $M[X]$ дискретной случайной величины X определяется как сумма произведений значений случайной величины на соответствующие вероятности:

$$M[X] = \sum x_i p_i. \qquad (3)$$

Математическое ожидание имеет смысл *среднего значения* случайной величины.

При решении практических задач для принятия решений требуется определить риск неблагоприятной ситуации. В качестве меры уровня риска обычно принимают *вероятность наступления неблагоприятных событий*.

Математические методы позволяют формализовать ответы на следующие вопросы.

Задача 1. Определить риск исхода A.

Искомый риск определяется на основе имеющихся статистических данных как вероятность $P(A)$ по формуле (1).

Задача 2. Определить риск того, что значения величины X будут ниже заданного критического значения $x_{кр}$ и оценить ожидаемые потери в сравнении с критическим значением.

Пусть известна функция распределения $F(x)$ случайной величины X финансовых выплат. Искомый риск определяется как значение $F(x_{кр})$ функции распределения в точке $x_{кр}$. Для определения ожидаемых потерь необходимо построить случайную величину R, характеризующую потери в сравнении с критическим значением. Величина R определяется следующим образом: $R = \begin{cases} 0, & \text{при } X \ge x_{кр}, \\ X - x_{кр}, & \text{при } X < x_{кр} \end{cases}$. Тогда ожидаемые потери по сравнению с критическим значением равны математическому ожиданию M[R] (3).

Задача 3. При заданном уровне допустимого риска α определить пороговое значение $x_{кр}$ случайной величины X, ниже которого она не опустится.

Пусть известна функция распределения $F(x)$ случайной величины X финансовых выплат. Пороговое значение $x_{кр}$ – корень уравнения $F(x) = \alpha$. Найденное значение показывает, что риск получить выплаты ниже порогового значения меньше допустимого риска α.

В теории финансовых рисков указанное пороговое значение $x_{кр}$ имеет общепринятое обозначение VaR (от англ. *Value at Risk* – «стоимость под риском»). VaR – это выраженная в денежных единицах оценка величины, которую не превысят ожидаемые в течение определенного периода времени потери с заданной вероятностью.

Если вероятность возникновения ситуации, приводящей к большим потерям, довольно мала, то ориентация ЛПР на такие ситуации при текущем управлении рисками нецелесообразна. При выборе оптимальной стратегии из рассмотрения имеет смысл исключить небольшую долю (обычно 5 % или 1 %) самых неблагоприятных случаев, т. е. сузить интервал возможных значений случайной величины.

Таможенные платежи: виды и порядок уплаты

Таможенные платежи – это таможенные пошлины (ввозные и вывозные), налоги (ввозные, НДС и акциз), сборы (за таможенное сопровождение, за таможенное оформление), взимаемые таможенными органами в области таможенного дела. Все виды платежей, взимаемых таможенными органами, включая средства, получаемые в счет возмещения затрат на хранение товаров на складах временного хранения и таможенных складах таможенных органов, подлежат перечислению в федеральный бюджет.

В Российской Федерации применяются следующие виды ставок пошлин [3]:

адвалорные, начисляемые в процентах к таможенной стоимости облагаемых товаров;

специфические, начисляемые в установленном размере за единицу облагаемых товаров;

комбинированные, сочетающие оба названных вида таможенного обложения.

Налог на добавленную стоимость (НДС), так же как и таможенная пошлина, имеет свои ставки. Ставки НДС бывают только адвалорными. В отличие от ставок таможенных пошлин, когда каждой категории товаров соответствует своя ставка, ставки НДС устанавливаются только в размере 10 % или 18 %. В частности, для отдельных категорий продовольственных товаров (скот и птица в живом весе, молоко и молокопродукты, сахар, мука, макаронные изделия и ряд других товаров), а также товаров для детей (трикотажные изделия для новорожденных, подгузники, обувь, игрушки, школьные тетради, тетради для рисования и некоторые другие товары), в соответствии с п. 2 ст. 164 НК РФ установлена ставка НДС в размере 10 %. В отношении *иных товаров*, ввозимых на таможенную территорию РФ, применяется ставка НДС в размере 18 % [1].

Налог на добавленную стоимость уплачивается таможенному органу, производящему таможенное оформление товаров, не позднее дня принятия грузовой таможенной декларации. Если таможенная декларация не была подана в срок, установленный Таможенным кодексом РФ, то сроки уплаты налога на добавленную стоимость исчисляются со дня истечения установленного срока подачи таможенной декларации. НДС уплачивается в безналичном порядке на счет Федерального Казначейства РФ (ФК РФ).

Возврат излишне уплаченных или взысканных сумм НДС производится в соответствии с Таможенным кодексом РФ по письменному заявлению плательщика [2].

В связи с большим разнообразием импорта, большой интерес представляет анализ финансовых рисков, связанных с взиманием «импортной составляющей» таможенных платежей. В следующем разделе мы рассмотрим задачу оценки риска получения ввозной таможенной пошлины и НДС ниже заданного контрольного уровня.

Данная задача является актуальной, поскольку в целях организации контроля и оценки эффективности деятельности региональных таможенных управлений и таможен разрабатываются и утверждаются контрольные показатели взимания таможенных платежей. Плановое задание составляется и корректируется с учетом сумм платежей фактически полученных в предыдущем периоде (квартале, году). Федеральная таможенная служба утверждает контрольные показатели взимания таможенных платежей и доводит их до сведения регионального таможенного управления (РТУ). Затем начальник отдела таможенных платежей РТУ предлагает руководству РТУ утвердить контрольные показатели взимания таможенных и иных платежей для подчиненных таможен.

Контрольные показатели, утвержденные руководителем отдела таможенных платежей РТУ, доводятся до сведения подчиненным таможням. В течение квартала, на который действует утвержденное плановое задание, таможни предоставляют информацию в РТУ о выполнении контрольных показателей взимания таможенных платежей. Следует отметить, что контрольные показатели могут корректироваться по запросу таможен, которые по объективным причинам не выполняют плановое задание в текущем квартале.

Таким образом, для отделов таможенных платежей таможен и региональных управлений является актуальной задача оценки риска получения

платежей ниже планового показателя. В следующем разделе будет предложен алгоритм оценки указанного финансового риска.

Алгоритм оценки финансового риска получения таможенных платежей ниже критического уровня

1. На первом этапе необходимо определить набор полей базы данных электронных копий ГТД/ТД, подлежащих анализу. Нам понадобятся три таблицы:

DCLHEAD – «ГТД – общие сведения»;

DCLTOVAR – «ГТД – сведения о товарах»;

DCLPLATR – «ГТД – исчисление таможенных платежей».

Для оценки финансового риска получения таможенных платежей ниже критического уровня нам понадобятся следующие поля:

G071 – Код таможенного органа (ключевое поле);

G072 – Регистрационный номер ГТД – дата регистрации (ключевое поле);

G073 – Регистрационный номер ГТД – порядковый номер (ключевое поле);

G011 – Направление перемещения товара (таблица DCLHEAD);

G33 – Код товара по ТН ВЭД (таблица DCLTOVAR);

G38 – Вес нетто, кг (таблица DCLTOVAR);

G36 – Преференции, особенности уплаты платежей (таблица DCLTOVAR);

G471 – Код вида платежа (таблица DCLPLATR);

G474 – Сумма платежа, руб. (таблица DCLPLATR.

2. Построим запрос к базе данных электронных копий ГТД/ТД на создание таблицы, содержащей информацию по выбранным полям. Направление перемещения товара: импорт (G011=«ИМ»). Будем рассматривать общие условия уплаты платежей (G36=«ОООО»). Если в отношении декларируемых товаров не запрашиваются льготы или особенности по уплате таможенных платежей, то в соответствующей позиции проставляется буква «О»),

3. Далее, работаем с таблицей в формате MS Excel. Выбираем год для анализа: проводим фильтрацию по полю G072.

4. Выбираем из полученной таблицы вид платежа:

Ввозная таможенная пошлина (G471 = 20; G072 < 1.01.2009 или G471 = 200; G072 > 31.12.2008);

НДС (G471 = 30; G072 < 1.01.2009 или G471 = 300; G072 > 31.12.2008).

5. Будем проводить анализ в разрезе товарных групп. Проведем фильтрацию данных по заданной товарной группе (первые две цифры поля G33).

6. Для каждой поставки определим индекс таможенных платежей заданного вида (сумма платежей с одного килограмма товара поставки) по формуле ИТП = ТП/ВП, где ТП – сумма таможенных платежей поставки (G474); ВП – вес поставки (G38).

Чтобы отличать ИТП по НДС от индекса таможенных платежей по пошлинам, будем обозначать его ИНДС.

7. Определим суммарный объем выбранного вида таможенных платежей и суммарный вес поставок за год.

8. На основе данных, полученных в п. 7, определим средний индекс таможенных платежей заданного вида за год по формуле ИТП*n* = ОТП/ОВП, где ОТП – общая сумма таможенных платежей за год (G474); ОВП – общий вес поставок за год (G38); *n* – год.

Чтобы различать ИТП*n* по НДС, будем для удобства обозначать его ИНДС*n*.

9. На основе планового задания определим плановый индекс таможенных платежей по формуле ИТПП = ТПП/ОВП, где ТПП – общая сумма таможенных платежей по плану на будущий год; ОВП – общий вес поставок за год (G38).

Если ИТП по каждой поставке в следующем году будет равняться ИТПП, то при сохранении физических объемов по данной группе, плановое задание будет выполнено. Как правило, плановое задание формируется на основе фактически собранных таможенных платежей за текущий год. Поэтому для определенности в наших расчетах мы будем использовать средний индекс таможенных платежей в качестве планового (критического) индекса таможенных платежей.

10. Определим долю каждой поставки в общем объеме по формуле Доля=ВП/ОВП, где ВП – вес поставок (G38); ОВП – общий вес поставок за год.

Найденные удельные веса поставок характеризуют риск того (см. Задачу 1), что все поставки будут иметь соответствующие ИТП (ИНДС).

Например, рассмотрим поставку за 2008 г. по 30-й товарной группе, со следующими параметрами:

вид платежа – таможенная пошлина (G471 = 20);

вес поставки ВП = 149 кг (графа G38);

таможенная пошлина ТП = 51 744,49 руб. (графа G474).

На основе имеющихся данных вычислим:

общий вес ОВП = 63 280 кг;

ИТП = 51744,49/149 = 347,2785 руб./кг;

доля = 149/63238 = 0,002356.

Найденные значения показывают, что вероятность (риск) получения таможенной пошлины в размере 347,2785 руб. с каждого килограмма составляет 0,2356 %. Иными словами, при сохранении общих закономерностей распределения цен, с вероятностью 0,2356 % по товарной группе 30 будет собрано: ОВП × 347,2785 руб. таможенных пошлин.

В частности, если общий физический объем в следующем году не изменится, то с вероятностью 0,.2356 % по товарной группе 30 будет собрано: 63280 × 347,2785 = 21 975 783,48 руб. таможенных пошлин.

11. Следующим этапом является построение эмпирической функции распределения индекса таможенных платежей. Для этого строится вариационный ряд индексов таможенных платежей: ИТП (ИНДС) каждой поставки ставится в соответствие с ее долей. Для определения риска получения платежей ниже планового уровня необходимо определить долю поставок, индекс таможенных платежей которых ниже планового (см. Задачу 2).

12. Завершающий этап исследования: оценка возможных потерь. Воспользуемся теорией из Задачи 2 и рассчитаем отклонения ИТП (ИНДС) каждой рисковой поставки от планового значения. Определим объем потерь по каждой рисковой поставки по формуле Потери = (ИТП–ИТПП)× ×ВП, где ИТП – индекс таможенных платежей поставки; ИТПП – индекс таможенных платежей плановый; ВП – вес поставки в общем объеме.

13. На основе вычисленных в п. 12 показателей находим суммарные потери. Полученная сумма характеризует потери бюджета в случае, когда ИТП нерисковых поставок будет совпадать с плановым индексом таможенных платежей.

Апробация методики оценки финансового риска получения таможенных платежей ниже критического уровня

Для апробации методики был проанализирован декларационный массив импортных товаров, оформляемых в зоне деятельности ЮТУ, за 2008 г. В табл. 1 представлены товарные группы, по которым были получены таможенные платежи в виде таможенных пошлин и НДС.

В соответствии с предложенной методикой был проведен анализ финансового риска для каждой товарной группы в разрезе таможенных пошлин и НДС за 2008 г. Расчеты были проведены в MS Excel.

Сводные результаты расчетов можно найти в таблицах 2 и 3. В них для каждой товарной группы представлены суммарный физический объем поставок, суммарные сборы по платежам (таможенные пошлины или НДС), средний индекс таможенных платежей, риск получения платежей ниже планового, суммарные потери и доля потерь относительно общих платежей.

На основе полученных расчетов можно сделать следующие выводы. Все товарные группы демонстрируют высокий финансовый риск получения платежей с индексом ниже среднего (планового) показателя.

Наиболее рисковой в 2008 г. относительно таможенных пошлин оказалась 81-я товарная группа: средний индекс таможенных пошлин составил 25,73 руб./кг, однако 97 % поставок принесло с каждого килограмма таможенных пошлин ниже 25,73 руб. (критического показателя). Если бы остальные 3 % поставок принесли бы таможенные пошлины по 25,73 руб. с каждого килограмма, то таможенное управление не выполнило бы задание по таможенным пошлинам на 3 946 297 руб., что составило бы 32 % от плана.

Аналогичная ситуация сложилась с НДС по 81-й товарной группе: средний индекс НДС составил 36,85 руб./кг, однако 97 % поставок принесло с каждого килограмма таможенных пошлин ниже 36,85 руб. (критического показателя). Если бы остальные 3 % поставок принесли налог на добавленную стоимость по 36,85 руб. с каждого килограмма, то таможенное управление не выполнило бы задание по НДС на 5 410 446 руб., что составило бы 30 % от плана.

Относительно НДС в 2008 г.: наибольший риск представляла 49-я товарная группа: средний индекс НДС составил 297,57 руб./кг, однако 99 % поставок принесло с каждого килограмма таможенных пошлин ниже 297,57 руб. (критического показателя). Если бы остальной 1 % поставок принес налога на добавленную стоимость по 297,57 руб. с каждого килограмма, то таможенное управление

Таблица 1

Товарные группы, оформляемые в зоне деятельности ЮТУ: импорт

Код товарной группы	Товарная группа
30	Фармацевтические продукты
49	Печатные книги, газеты, репродукции и др. изделия полиграфической промышленности; рукописи, машинописные тексты и планы
61	Одежда и принадлежности одежды, трикотажные
62	Одежда и принадлежности одежды, текстильные (кроме трикотажных)
64	Обувь, гетры и аналогичные изделия; их части
71	Жемчуг природный или культивированный, драгоценные или полудрагоценные камни, драгоценные металлы, плакированные драгоценными металлами, и изделия из них; бижутерия; монеты
74	Медь и изделия из нее
81	Прочие недрагоценные металлы; металлокерамика; изделия из них
88	Летательные аппараты, космические аппараты, их части
90	Приборы и аппараты оптические, фотографические, кинематографические, измерительные, контрольные, прецизионные, медицинские и хирургические; их части и принадлежности
91	Часы и их части

не выполнило бы задание по НДС на 81 303 992 руб., что составило бы 91 % от плана. Риск, связанный с уплатой таможенных пошлин по 49-й товарной группе в 2008 г. также велик: 88 % поставок

Таблица 2

Финансовый риск, связанный с уплатой таможенных пошлин, в зоне деятельности ЮТУ: импорт, 2008 г.

Товарная группа	Суммарный вес, кг	Суммарные сборы по платежам, руб.	ИТП 2008, руб./кг	Риск, %	Суммарные потери, руб.	Доля потерь, %
30	63 238	3 129 918	49,49	76	–2 096 130	67
49	152 832	6 295 062	41,19	88	–3 252 112	52
61	362 577	40 376 174	111,36	75	–5 886 875	15
62	245 318	32 539 569	132,64	73	–5 184 878	16
64	7 124 446	200 708 227	28,17	64	–86 803 322	43
71	68 788	9 659 885	140,43	29	–1 551 769	16
74	829 201	12 171 277	14,68	85	–2 690 469	22
81	486 339	12 512 106	25,73	97	–3 946 297	32
88	393 718	219 755 121	558,15	38	–66 241 221	30
90	1 639 111	70 563 363	43,05	78	–39 681 903	56
91	81 350	6 071 703	74,64	74	–1 971 198	32

Таблица 3

Финансовый риск, связанный с уплатой НДС, в зоне деятельности ЮТУ: импорт, 2008 г.

Товарная группа	Суммарный вес, кг	Суммарные сборы по НДС, руб.	ИНДС 2008, руб./кг	Риск, %	Суммарные потери, руб.	Доля потерь, %
30	63 238	5 949 634	94,08	83	–4 046 427	68
49	299 514	89 127 050	297,57	99	–81 303 992	91
61	362 577	42 776 954	117,98	71	–6 568 303	15
62	244 161	34 450 464	141,10	72	–5 639 931	16
64	5 771 667	244 273 248	42,32	68	–100 278 649	41
71	68 787	5 220 763	75,90	76	–1 953 481	37
74	827 591	45 922 617	55,49	85	–10 160 947	22
75	9 734	2 481 409	254,91	75	–622 472	25
81	485 920	17 904 597	36,85	97	–5 410 446	30
88	394 483	246 357 218	624,51	36	–69 868 130	28
90	2 759 506	500 799 468	181,48	76	–293 173 269	59
91	80 194	3 613 754	45,06	81	–1 060 583	29

принесло в бюджет ниже 41,19 руб. с килограмма, при среднем индексе таможенных пошлин равном 41,19 руб./кг. Если бы остальные 12 % поставок принесили в бюджет по 41,19 руб. с килограмма, то план был бы не выполнен на 3 252 112 руб.

Столь высокий риск в описанных примерах говорит о том, что общий объем платежей, собранных по 81-й и 49-й товарным группам, главным образом был сформирован небольшим числом разовых поставок, которые в будущем с высокой степенью вероятности могут не повториться. Следовательно, ориентироваться на эти поставки в будущем при составлении планового задания нецелесообразно.

Наиболее результативным подходом было бы исключить из рассмотрения небольшой процент (например, 5 %) поставок с наивысшими индексами таможенных платежей и с наименьшими индексами (см. Задачу 3). В оставшейся совокупности определить средний индекс и умножить его на ожидаемые физические объемы поставок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Налоговый кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 117 от 05.08.2000; по состоянию на 05.04.2010. [Электронный ресурс]/СПС «Гарант».

2. Таможенный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 61-ФЗ от 28.05.2003; по состоянию на 13.04.2010. [Электронный ресурс]/СПС «КонсультантПлюс».

3. О таможенном тарифе: Федеральный закон РФ № 5003-1 от 21.05.1993; по состоянию на 28.05.2010. [Электронный ресурс]/СПС «КонсультантПлюс».

4. Об утверждении Концепции системы управления рисками в таможенной службе Российской Федерации: приказ ГТК от 26.09.2003 № 1069 [Электронный ресурс]/СПС «Консультант Плюс».

5. **Гмурман, В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособ. для вузов [Текст]/ В.Е. Гмурман.–М.: Высш. шк., 2007.

6. **Кудрявцев, О.Е.** Математические методы оценки рисков: Учеб. пособ. [Текст]/О.Е. Кудрявцев.–Ростов н/Д: Российская таможенная академия, Ростовский филиал, 2009.–С. 65

7. Товарная номенклатура внешнеэкономической деятельности России.–СПб.: Тирекс, 2004.–544 с.

8. Описание электронной копии грузовой таможенной декларации в формате DBASE (внутренний формат). Версия 04.00.04 от 01.01.2009. [Электронный ресурс]/ http://www.customs.ru/

9. Kyoto Convention, General Annex, Ch. 6, Guidelines on Customs Controls.–1999.–P. 1–30.

УДК:004.9:[656.625.078.89.004.12:658.012]

А.А. Ханова, И.О. Бондарева

СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ КАЧЕСТВА ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Развитие внутреннего водного транспорта Российской Федерации предполагает превращение его в современную, высокоэффективную и устойчиво функционирующую отрасль транспортного комплекса государства. В связи с этим в европейской части страны приоритетным является развитие портов, расположенных в зоне действия международного транспортного коридора «Север–Юг», основная ветвь которого проходит в направлении Санкт-Петербург – Москва – Астрахань – Иран – Индия и по трассе Азов–Астрахань. Транзитный потенциал Российских транспортных коммуникаций может привлечь до 10–15 % евроазиатского грузопотока, что в финансовом эквиваленте составляет около 900 млрд руб.

Согласно концепции развития внутреннего водного транспорта РФ основная задача портов состоит в повышении их конкурентоспособности и привлекательности для грузовладельцев с точки зрения уровня сервиса, скорости доставки и обеспечения сохранности грузов, определяющих качество логистического обслуживания. Таким образом, перед каждым портом стоит проблема управления качеством, включающая возможность его оценки на основе набора определенных критериев, а также возможность формирования управленческих решений исходя из уровня качества логистического обслуживания. Принимая во внимание сложность большинства процессов, протекающих в грузовых портах, а также тот факт, что управление качеством логистического обслуживания является трудноформализуемой задачей, в связи с чем проведение натурного эксперимента в порту не представляется возможным, предложено построить имитационную модель [1] функционирования грузового порта, позволяющую осуществить оценку качества логистического обслуживания, производимого портом.

Разработка имитационной модели грузового порта

Разработан моделирующий алгоритм имитационной модели грузового порта, включающий в себя структурную схему процесса логистического обслуживания грузового порта и детальную схему моделирующего алгоритма (рис. 1, 2*а*).

Имитационная модель построена для деятельности портов в целом, однако данные для модели использовались в рамках деятельности ЗАО «Астраханский морской порт», работающего со следующими видами грузов: асбест, лес, бумага, металлопрокат (лист и швеллер) [2]. Осуществлен подбор параметров моделирования: определены факторы случайности системы и соответствующие им входные распределения на основе собранных эмпирических данных. Произведена проверка соответствия полученных распределений с использованием среднеквадратичной ошибки, а также критериев для проверки гипотез хи-квадрат и Колмогорова–Смирнова. Всего проделано тридцать восемь таких операций (по количеству факторов случайности системы). Для системы, отражающей деятельность грузового порта, выделено четырнадцать факторов случайности (интервалы между: моментами поступления заявок на погрузку, моментами принятия заявки и поступления груза в порт, моментами отгрузки груза в порт и прихода транспорта, на который этот груз необходимо погрузить; процентное соотношение заявок по различным типам груза и т. д.).

Используя детальную схему моделирующего алгоритма и учитывая подобранные параметры модели (распределения вероятностей случайных чисел), построена логическая схема моделирующего алгоритма (рис. 2, *б*), представляющая собой логическую структуру модели процесса функционирования системы. На основе логической схемы моделирующего алгоритма построена имитационная модель оценки качества обслуживания грузового порта с использованием программного продукта Arena 8.0. Осуществлена проверка построенной имитационной модели на адекватность реальному объекту методами верификации моделирующих компьютерных программ, методами повышения валидации и доверия к модели, а также на основе использования критерия Стьюдента. Данная

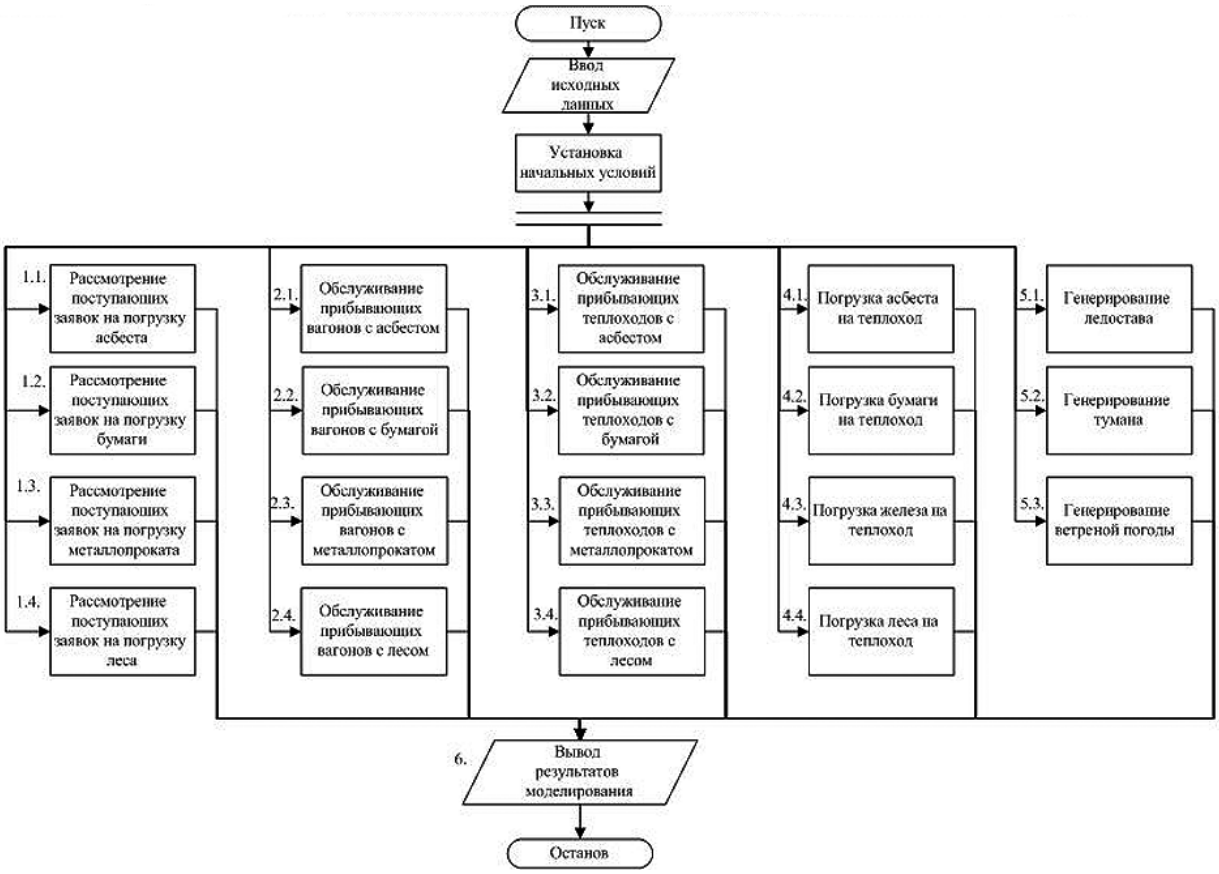


Рис. 1. Детальная схема моделирующего алгоритма

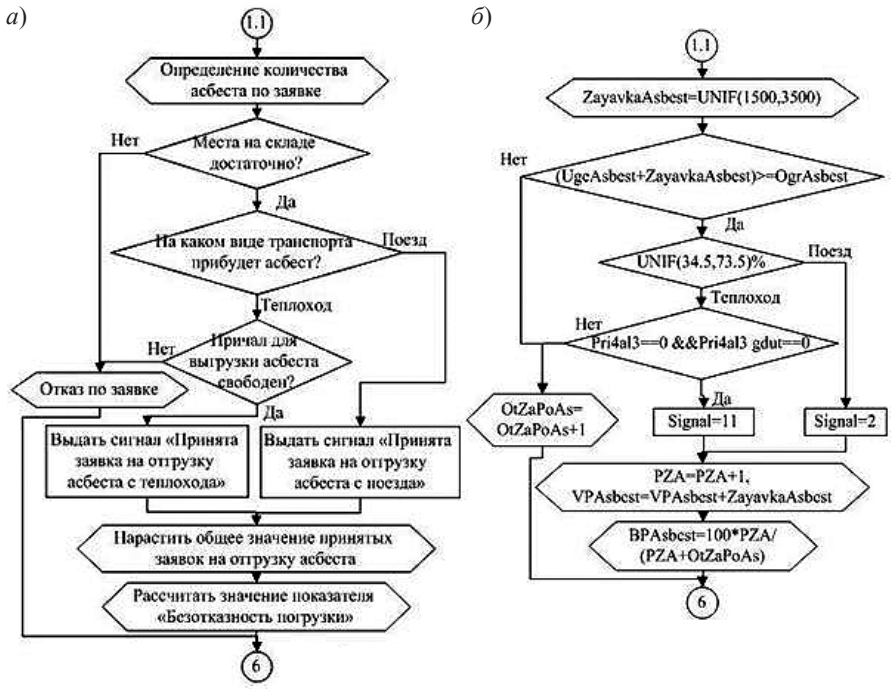


Рис. 2. Детализация блока 1.1 моделирующего алгоритма: *а* – детальная схема; *б* – логическая схема

проверка показала, что отклонение данных, полученных при моделировании, от эмпирических, собранных в порту, составило от 0 до 7,1 %, что позволяет говорить об адекватности модели.

Метод оценки качества логистического обслуживания

Разработан метод оценки качества логистического обслуживания грузового порта, позволяющий на основе выбранной системы показателей качества логистического обслуживания и построения имитационной модели порта определить количественные значения показателей и, используя построенные функции принадлежностей каждого из показателей, сопоставить получившиеся значения показателей качества со значением соот-

Таблица 1

Система показателей качества логистического обслуживания

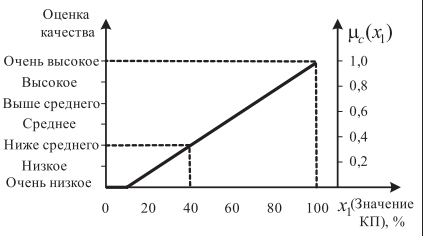
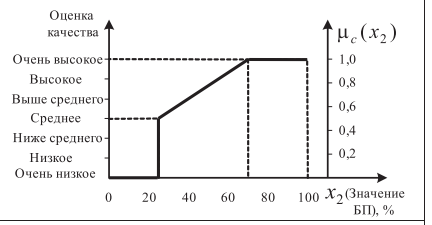
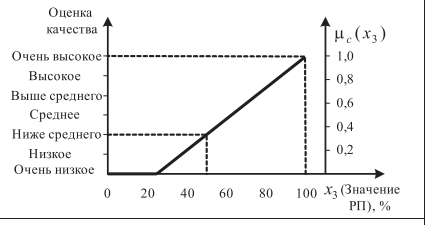
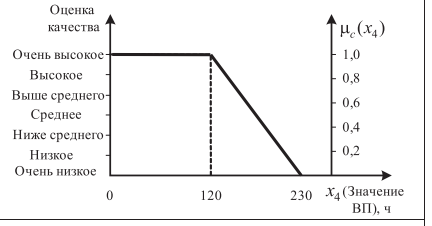
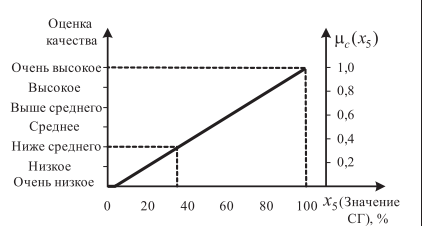
Показатель	Формула и единицы измерения Расшифровка величин, входящих в расчетную формулу	Совместный график функции принадлежности показателя и оценки качества (значения лингвистической переменной)
Качество погрузки (КП)	$КП = \frac{КВЗ_{б.о.}}{КВЗ_{общ}} * 100\ \%,\ \%$ $КВЗ_{б.о.}$ – количество выполненных за период времени T заявок, полностью соответствующих количественным и качественным характеристикам; $КВЗ_{общ}$ – общее количество выполненных заявок за тот же период времени T	
Безотказность погрузки (БП)	$БП = \frac{КПрЗ}{КПЗ} * 100\ \%,\ \%$ КПрЗ – количество принятых за период времени T заявок; КПЗ – количество поступивших заявок за тот же период времени T	
Репутация предприятия (РП)	$РП = \frac{КВЗ_{б.п.}}{КВЗ_{общ}} * 100\ \%,\ \%$ $КВЗ_{б.п.}$ – количество выполненных за период времени T заявок, по которым не поступило претензий.	
Время погрузки (ВП)	$ВП = \frac{T_п}{КВЗ_{общ}},\ ч$ $T_п$ – общее время погрузки	
Сохранность груза при погрузке (СГ)	$СГ = \frac{КПГ}{КПГ_{поз}} * 100\ \%,\ \%$ КПГ – количество фактически погруженного за период T груза, т; $КПГ_{поз}$ – количество груза, которое необходимо было погрузить за период T, т	

Рис. 3. Алгоритм формирования управленческих решений
x_i – значение i-го показателя качества; b_i – соответствующее ему значение приоритета;
m_i – соответствующее значение коэффициента весомости показателя;
k – число факторов, участвующих в эксперименте

ветствующей функции принадлежности, а также с соответствующими параметрами качества – значениями лингвистической переменной (x_i – значение i-го показателя качества, i=1..n, n = 5 – количество показателей, учитываемых при оценке качества логистического обслуживания). Создана сводная таблица системы показателей (табл. 1).

Предложен и описан алгоритм формирования управленческих решений на основе разработанного метода (рис. 3).

Сценарный подход к оценке качества логистического обслуживания

Рассмотрим процесс формирования рекомендаций для принятия управленческих решений на основе сценариев проведения экспериментов с имитационной моделью. В терминологии планирования экспериментов входные переменные и структурные допущения, составляющие модель, называются *факторами*, а выходные показатели работы – *откликами*. Полнофакторный эксперимент с моделью на основе факторного плана типа 2^6 проводился со следующими изменениями значений факторов: увеличение площади склада на 10 %, увеличение интенсивности поступления заявок на 10 %, т. е. уменьшение интервала времени между моментами прибытия заявок на 10 %, увеличение нормы выгрузки/погрузки на 10 %, увеличение числа кранов, погрузчиков и причалов на 1 единицу соответственно. В роли откликов предлагалось использовать выбранные показатели качества логистического обслуживания грузового порта. Численные значения факторов влияния представлены в табл. 2.

Главный эффект фактора – средняя величина изменения в отклике, обусловленная переходом фактора с уровня «–» на уровень «+», в то время как остальные факторы остаются без изменений. Например, для выбранного факторного плана типа 2^6 главный эффект фактора Φ_1 определяется следующим образом:

$$e_1 = \sum_{i=2}^{n} \frac{2(R_i - R_{i-1})}{n},$$

Таблица 2

Схема кодирования для факторов первого этапа эксперимента с имитационной моделью

Фактор	Описание фактора	– (текущее состояние)	+ (измененное состояние)
$Ф_1$	Число единиц погрузочной техники (кранов)	9	10
$Ф_2$	Число единиц погрузочной техники (погрузчиков)	8	9
$Ф_3$	Число причалов порта	3	4
$Ф_4$	Площадь складского комплекса грузового порта, м²	15200	16720
$Ф_5$	Интенсивность поступления заявок на погрузку, ч: асбеста бумаги пилолеса металлопроката	 UNIF(23.5, 48.5) UNIF(19.5, 48.5) UNIF(25.5, 43.5) UNIF(21.5, 37.5)	 UNIF(21.15, 43.65) UNIF(17.55, 43.65) UNIF(22.95, 39.15) UNIF(19.35, 33.75)
$Ф_6$	Норма выгрузки/погрузки, т/сут: асбеста бумаги пилолеса металлопроката: лист швеллер	 600 600 1000 600 800	 660 660 1100 660 880

где R_i – переменные при i = 2, 4, 6, 8, …, 64 являются значениями отклика, когда выполняется моделирование i-й комбинации уровней факторов. Аналогично были вычислены главные эффекты от остальных факторов.

Для более точного представления картины и для принятия более четких управленческих решений необходимо рассмотреть влияние нескольких факторов на отклики, т. к. зачастую может случиться так, что эффект одного фактора некоторым образом будет зависеть от какого-либо другого фактора. В таком случае считается, что эти два фактора взаимодействуют. Степень их взаимодействия можно измерить эффектом взаимодействия двух факторов $e_{Ф1,\ Ф2}$, который определяется как половина разности между средним эффектом фактора $Ф_1$, когда фактор $Ф_2$ находится на уровне «+» (а все остальные факторы, кроме $Ф_1$ и $Ф_2$, остаются неизменными), и средним эффектом фактора $Ф_1$, когда фактор $Ф_2$ находится на уровне «–»:

$$e_{df} = \frac{\sum_{i=1}^{32} R_{q_i} - \sum_{i=1}^{32} R_{s_i}}{2^{k-1}},$$

где $\sum_{i=1}^{32} R_{q_i}$ – сумма значений откликов, когда оба фактора находятся на одинаковых уровнях; $\sum_{i=1}^{32} R_{s_i}$ – сумма значений откликов, когда оба фактора находятся на противоположных уровнях; q_i и s_i – порядковые номера откликов, когда оба фактора находятся на одинаковом и противоположных уровнях соответственно. Аналогично выводятся формулы для оценки влияния тройки, четверки и шестерки факторов взаимодействия.

Принимая во внимание все полученные эффекты взаимодействия для различного числа факторов, сравним комбинации факторов, оказывающие наибольшее положительное и отрицательное влияние на показатели в том или ином случае (табл. 3). Исходя из данных можно сделать вывод, что наибольшее положительное влияние на показатель КП оказывает взаимодействие факторов $Ф_4$ и $Ф_5$, на БП – $Ф_1$, на ВП – $Ф_1$ и $Ф_5$, на РП – $Ф_2$, $Ф_3$, $Ф_4$ и $Ф_5$, и на СГ – взаимодействие всех шести факторов. Наибольшее отрицательное влияние на показатели КП, БП, РП и СГ оказывает взаимодействие факторов $Ф_1$, $Ф_3$, $Ф_4$, $Ф_5$ и $Ф_6$, на ВП – $Ф_1$, $Ф_3$ и $Ф_5$.

Результаты вычислений представлены в виде диаграмм (табл. 4). Разработанные диаграммы показывают зависимость показателя от влияния факторов. Лучи диаграмм – это комбинации взаимодействия факторов. Пунктирной линией обо-

Таблица 3

Комбинации факторов, оказывающих наибольшее положительное и отрицательное влияние на показатели качества

Число факторов взаимодействия	Комбинации факторов, при которых оказывается наибольшее положительное (+) и наибольшее отрицательное (–) влияние на показатели / Наибольшие (+) и наименьшие (–) значения эффектов взаимодействия факторов									
	КП		БП		ВП		РП		СГ	
	+	–	+	–	+	–	+	–	+	–
1	нет	6/–4,46	1/4,45	5/–1,47	3/ –19,43	2/ 11,10	5/0,11	6/–2,24	5/0,16	6/ –0,19
2	4,5/ 2,96	1,4/ –2,13	5,6/ –2,35	2,6/ –2,69	1,5/ –29,75	5,6/ 18,56	1,2/ 1,61	4,6/ –1,97	2,5/ 0,17	2,6/ –0,11
3	1,2,5/ 2,53	1,5,6/ –2,25	2,4,5/ 3,07	2,3,4/ –1,67	1,2,3/ –14,67	1,3,5/ 18,79	1,2,4/ 0,97	1,4,6/ –2,14	2,4,6/ 0,13	3,4,6/ –0,13
4	2,3,4,5/ 2,42	1,3,4,6/ –5,03	1,4,5,6/ 2,88	1,3,4,6/ –3,02	2,3,4,5/ –13,81	1,2,3,4/ 16,1	2,3,4,5/ 1,67	1,3,4,6/ –5,07	2,3,4,5/ 0,14	1,3,4,6/ –6,21
5	2,3,4,5, 6/0,80	1,3,4,5, 6/-6,27	2,3,4,5, 6/0,11	1,3,4,5, 6/–5,83	1,3,4,5, 6/–9,54	нет	1,2,4,5, 6/1,08	1,3,4,5, 6/–6,41	2,3,4,5, 6/0,11	1,3,4,5, 6/–6,16
6	нет	1,2,3,4, 5,6/ –1,86	нет	1,2,3,4, 5,6/ –0,41	нет	1,2,3,4, 5,6/ 13,62	нет	1,2,3,4, 5,6/ –0,57	1,2,3,4, 5,6/ 0,39	нет

значено нулевое значение эффекта взаимодействия.

Для выбора того или иного состояния факторов, позволяющего максимизировать эффект их взаимодействия, необходимо комплексно рассматривать результаты экспериментов. Так, для начала необходимо выбрать показатель, достижение увеличения или уменьшения значения которого является наиболее желаемым. А затем следует рассмотреть все остальные показатели и влияние на них выбранных факторов.

Обоснование эффективности предложенных решений

На основе полученных результатов экспериментов с помощью лексикографического метода отобраны комбинации взаимодействия факторов. Описан выбор оптимального набора факторов путем определения интегрального показателя качества на основе аддитивного метода свертки критериев (рис. 3).

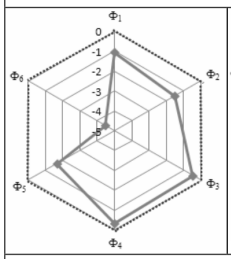
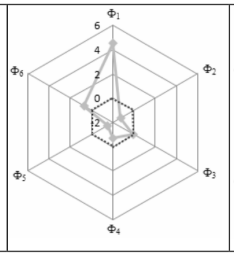
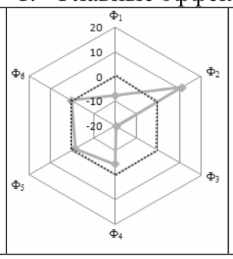
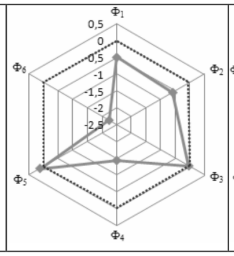
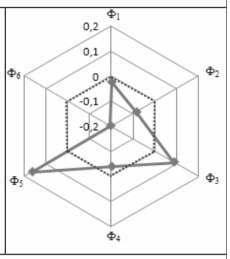
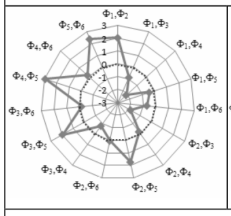
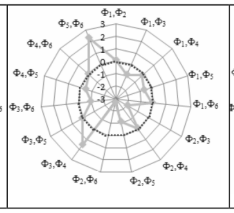
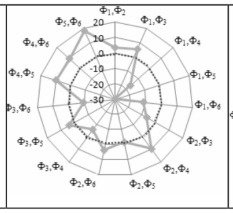
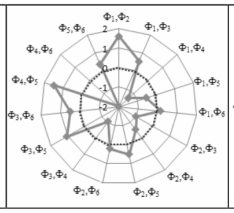
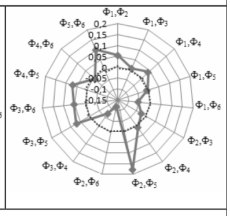
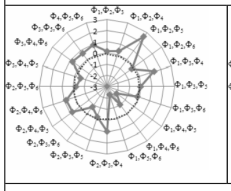
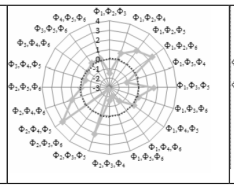
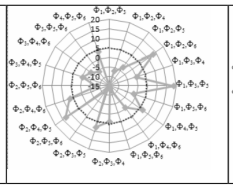
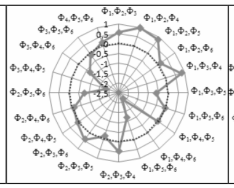
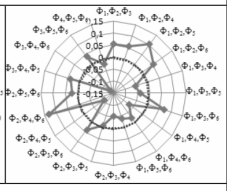
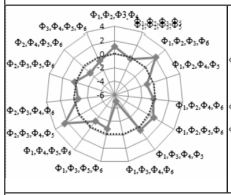
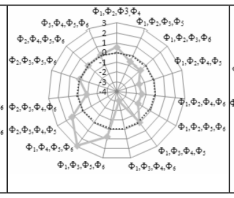
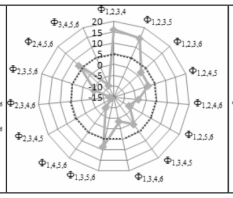
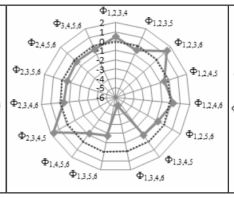
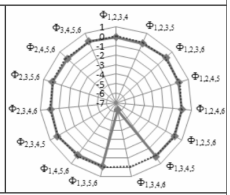
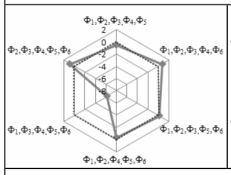
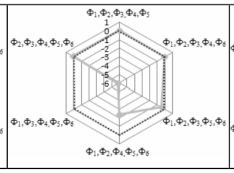
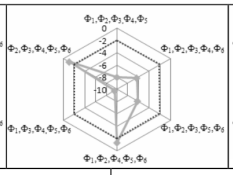
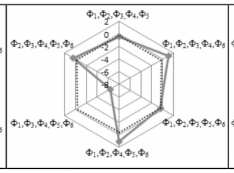
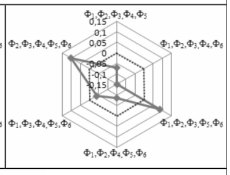
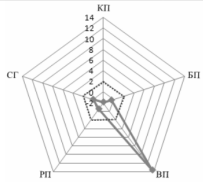
В качестве оптимальной комбинации факторов определена комбинация факторов 1, 4, 5 и 6. Интегральный показатель, вычисленный на основе данных, полученных при прогоне модели с базовыми параметрами (соответствующими реальным условиям порта на данный момент), составил 0,32. По итогам эксперимента можно говорить о достижении результата, на 73 % превосходящего базовый пример. На основе полученных данных сформированы управленческие решения. Анализ результатов моделирования позволил выявить повышение уровня качества предоставляемых портом услуг в среднем на 36,2 % (по значениям интегральных показателей).

Также можно сделать вывод о том, что использование имитационной модели порта по повышению качества логистического обслуживания грузового порта позволяет в среднем увеличить значение показателя «Качество погрузки» на 2,5 %, «Безотказность погрузки» – на 10,2 %, «Репутация предприятия» – на 3,3 %, «Сохранность груза» – на 1,7 %, и сократить значение показателя «Время погрузки» в среднем на 16,1 % (табл. 5).

Интегральный показатель, вычисленный для различных вариантов расстановок предпочтений, превосходит соответствующее ему базовое значение в среднем на 20,2–139, 4 %. Причем, интегральные показатели, вычисленные для случая, предполагающего, что наиболее предпочтительным является значение показателя КП, превосходят соответствующие им значения базового интегрального показателя в среднем на 23,7 %. В случае исследования показателя БП как наиболее предпочтительного, было выявлено превосходство инте-

Таблица 4

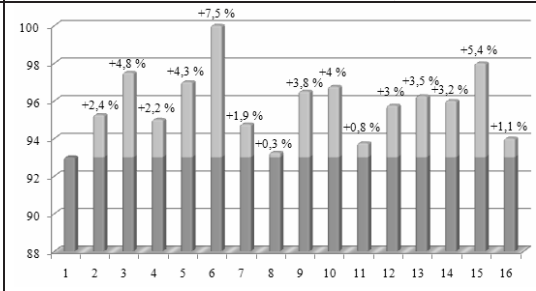
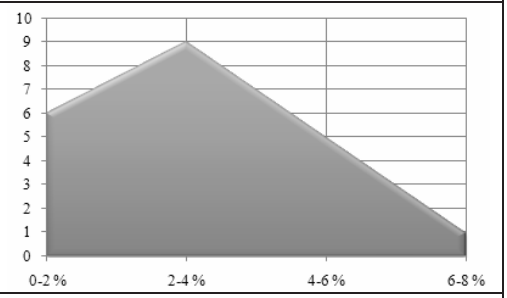
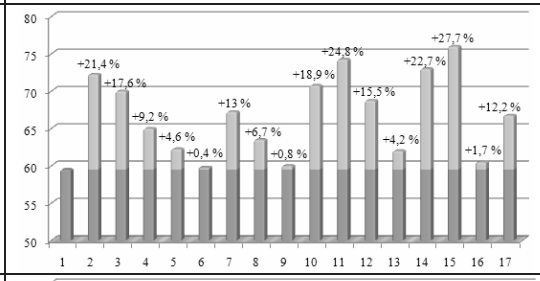
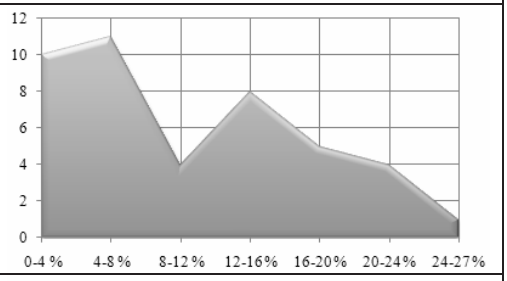
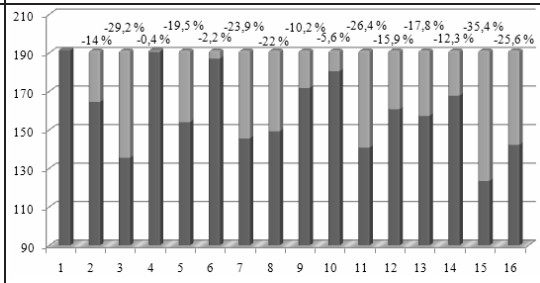
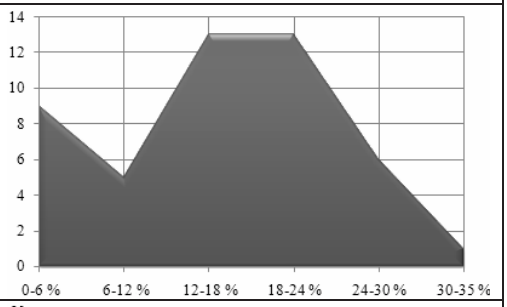
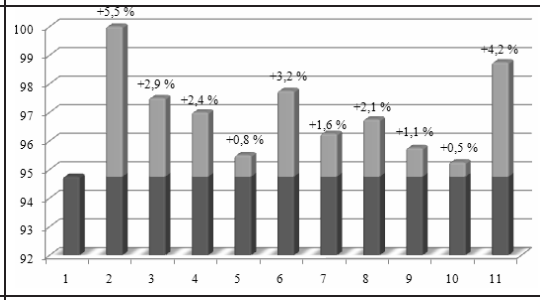
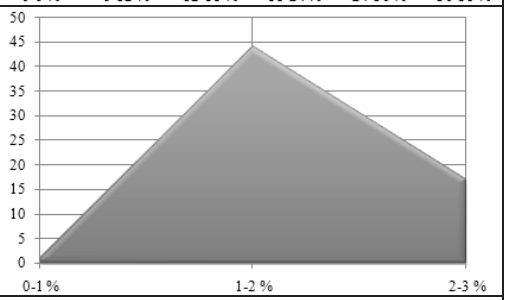
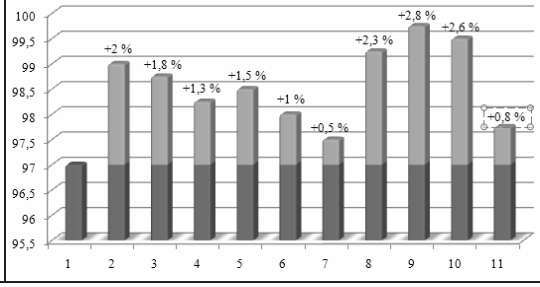
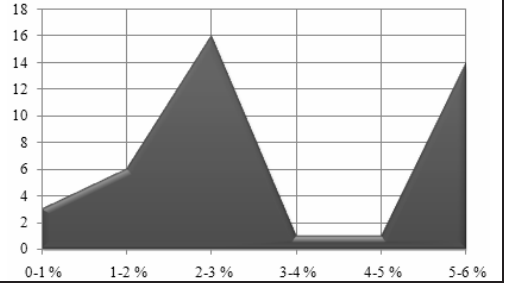
Главные эффекты и эффекты взаимодействия факторов для показателей качества логистического обслуживания

КП	БП	ВП	РП	СГ
1. Главные эффекты				
				
2. Эффекты взаимодействия двух факторов				
				
3. Эффекты взаимодействия трех факторов				
				
4. Эффекты взаимодействия четырех факторов				
				
5. Эффекты взаимодействия пяти факторов				
				
6. Эффект взаимодействия шести факторов				

грального показателя над базовым интегральным в среднем на 41,5 %. В ходе экспериментов с наиболее предпочтительным показателем ВП получены результаты, позволяющие говорить о возможности повышения значения интегрального показателя в среднем на 139,4 %. В рамках рассмотрения показателя РП как наиболее приоритетного, выявлено повышение интегрального показателя в среднем на

Таблица 5

Анализ результатов моделирования

Показатели	Увеличение значения показателей после испытания имитационной модели (темно-серым цветом показано базовое значение показателя)	Распределение количества значений показателей в зависимости от процента его превосходства над базовым значением
КП		
БП		
ВП		
РП		
СГ		

21,2 %. Превосходство интегрального показателя над базовым интегральным выявлено также при рассмотрении показателя СГ в качестве наиболее приоритетного и составило в среднем 20,2 %.

Описана возможность и обоснована необходимость проведения сценарного анализа грузового порта путем планирования проведения экспериментов с имитационной моделью с помощью факторных планов с целью выявления влияния тех или иных факторов, присутствующих в осуществлении процессов в грузовом порту, на результирующие значения показателей качества логистического обслуживания. Определены наборы факторов, оказывающие явное прямое или косвенное влияние на значения выбранных показателей качества логистического обслуживания грузового порта (отдельно для каждого показателя). Осуществлено шестьдесят четыре прогона модели с различными комбинациями состояний выбранных факторов. Получены значения всех откликов (выходных показателей) при каждом прогоне модели. На основе этих данных рассчитаны главные эффекты влияния каждого фактора на отдельные показатели и эффекты взаимодействия двух, трех, четырех, пяти и шести факторов, оказывающих влияние на отклики. Проанализированы все получившиеся результаты расчетов главных эффектов и эффектов взаимодействия. Выявлены комбинации факторов, оказывающие наибольшее положительное и отрицательное влияние на показатели качества, а также проанализированы наибольшие и наименьшие значения эффектов взаимодействия факторов, влияющих на показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кельтон, В** Имитационное моделирование. Классика CS [Текст]/В. Кельтон, А. Лоу.–СПб.: Питер; Киев: Издат. группа BHV, 2004. – 847 с.

2. Св. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ 2008611883, Российская Федерация. Компьютерная система оценки качества логистического обслуживания грузового порта на основе имитационного моделирования [Текст]/А.А. Ханова, И.О. Григорьева; правообладатель Астр. гос. техн. ун-т.- № 2008610791; дата поступл. 28.02.2008; дата регистр. 16.04.2008.

УДК 656.7:63:658.53

Р.Б. Алтынбаев, С.Г. Хибатуллин

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ РАБОТ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЩЕСТВ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В статье описывается научно-обоснованный метод расчета времени выполнения отдельных элементов полета воздушных судов при проведении авиационного распределения веществ и биологических объектов (АРВ и БО) в сельском хозяйстве. Предлагаемый метод является расчетно-аналитическим и основывается на моделировании процесса выполнения отдельных элементов полета. В качестве исходных данных используются традиционный набор летно-технических характеристик воздушного судна для каждого варианта сельскохозяйственного оборудования и подробные данные о технологии различных видов АРВ и БО и их способах.

Для расчета времени выполнения отдельных элементов полета применяется метод определения времени полета для всех, даже самых мелких, элементов полета. В дальнейшем методика расчета показана на примере самолета Ан-2 для полетов, выполняемых челночным способом. Челночный способ выбран как наиболее часто встречающийся (обрабатывается более 95 % площадей) при выполнении АРВ и БО [1].

На рис. 1 показан типовой профиль полета при выполнении АРВ и БО челночным способом, на котором выделены все первичные составляющие элементов полета. В качестве первичных составляющих приняты: 1 – взлет и разгон до ско-

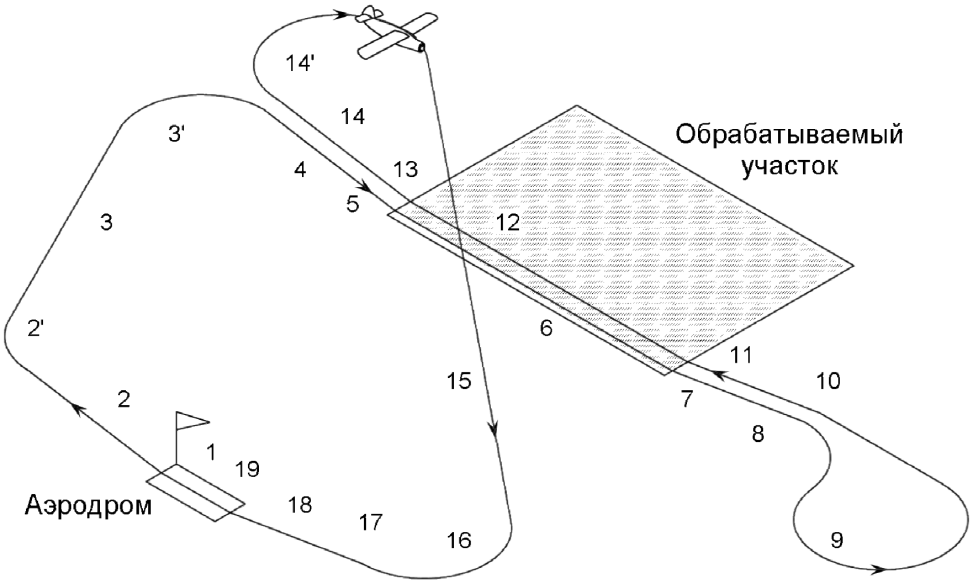


Рис.1. Схема полета самолета Ан-2 при обработке челночным способом

рости набора высоты ($t^1_{взл}$); 2 – набор высоты для подлета к полю ($t^2_{наб}$); 2' – разворот на курс следования ($t^{2'}_{разв}$); 3 – горизонтальный полет к полю ($t^3_{г.п.}$); 3' – разворот для захода на поле ($t^{3'}_{разв}$); 4 – снижение на поле ($t^4_{сн}$); 5 – горизонтальный полет на высоте гона до захода на гон ($t^5_{г.п.}$); 6 – полет над полем ($t^6_{гон}$); 7 – горизонтальный полет после выхода из гона до начала набора высоты ($t^7_{вых}$); 8 – набор высоты для разворота на повторный гон ($t^8_{наб}$); 9 – разворот на повторный гон ($t^9_{разв}$); 10 – снижение на поле ($t^{10}_{сн}$); 11 – горизонтальный полет после снижения на высоте гона до захода на гон ($t^{11}_{вх}$); 12 – полет над полем ($t^{12}_{гон}$); 13 – горизонтальный полет после выхода из гона до начала набора высоты ($t^{13}_{г.п.}$); 14 – набор высоты для подлета к аэродрому ($t^{14}_{наб}$); 14' – разворот для полета к аэродрому ($t^{14'}_{разв}$); 15 – горизонтальный полет к аэродрому ($t^{15}_{г.п.}$); 16 – разворот для захода на посадочный курс ($t^{16}_{разв}$); 17 – снижение на аэродром ($t^{17}_{сн}$); 18 – выдерживание самолета на посадочной прямой ($t^{18}_{вых}$); 19 – посадка и пробег ($t^{19}_{пос}$).

Расчет ведется для всех первичных составляющих элементов полета (кроме горизонтальных участков при перелете от аэродрома до поля и обратно и времени нахождения над полем) следующим образом:

$t^1_{взл}$ – по руководству по летной эксплуатации;

$$t^2_{наб},\ t^8_{наб},\ t^{14}_{наб} = \frac{\Delta H}{V_{yi} K_t}; \qquad (1)$$

$$t^{2'}_{разв},\ t^{3'}_{разв},\ t^{14'}_{разв},\ t^{16}_{разв} = \frac{2\pi V_{разв}}{g \cdot \mathrm{tg}\gamma}\left(\frac{\varphi}{360}\right) \cdot K_t; \qquad (2)$$

$$t^9_{разв} = \left[\frac{2\pi V_{разв}}{g \cdot \mathrm{tg}\gamma}\left(\frac{180+2\varphi}{360}\right) + \frac{2R\sin\varphi}{V_{разв}}\right] \cdot K_t; \qquad (3)$$

$$t^4_{сн},\ t^{10}_{сн},\ t^{17}_{сн} = \frac{\Delta H}{V_{yi} K_t}; \qquad (4)$$

$$t^5_{г.п.},\ t^7_{вых},\ t^{11}_{вх},\ t^{13}_{г.п},\ t^{18}_{вых} = \frac{S}{K_V V_{(г.п)i}}; \qquad (5)$$

$t^{19}_{пос}$ – по руководству по летной эксплуатации,

где V – воздушная скорость самолета; V_y – вертикальная составляющая скорости самолета на этапах набора высоты и снижения; ΔH – изменение высоты на отдельном этапе полета; S – протяженность отдельного этапа полета; φ – угол разворота самолета; γ – угол крена самолета в развороте; R – радиус разворота; K_t, K_v – коэффициенты, учитывающие изменение времени полета и средней скорости полета от воздействия ветра.

Полеты при выполнении АРВ и БО, как и другие виды полетов, обычно выполняются в условиях, отличных от штилевых. Следовательно, как на время полета в целом, так и на время его отдельных элементов ветер оказывает некоторое влияние, которое необходимо учитывать. Особенности полетов при выполнении АРВ и БО заключаются в том, что существенную часть их времени, наряду с прямолинейными участками (полет к полю и обратно, полет над полем), составляют различные маневры, в т. ч. и координированные.

При полетах по прямолинейным участкам влияние ветра на время полета можно учитывать аналогично влиянию ветра в транспортном полете. Коэффициент, учитывающий увеличение времени полета, рассчитывается для ожидаемых условий эксплуатации методом численного интегрирования по формуле:

$$K_t = \frac{1}{n}\int_0^{360} \frac{Vdx}{U\cos x + \sqrt{V^2 - U^2\sin^2 x}}, \quad (6)$$

где U – ожидаемая скорость ветра; x – угол ветра; n – число интервалов интегрирования.

Поскольку при определении производительности полетов расчет ведется для конкретных условий выполнения АРВ и БО, поправку на ветер целесообразно вводить при определении скорости выполнения прямолинейного этапа полета. Такая поправка определяется методом численного интегрирования по формуле:

$$K_V = \frac{1}{n}\int_0^{360} \frac{U\cos x + \sqrt{V^2 - U^2\sin^2 x}}{V} dx. \quad (7)$$

Время полета по некоторому прямолинейному участку в этом случае определяется выражением:

$$t_{\text{пол}} = \frac{\text{S}}{K_V V}. \quad (8)$$

Аналогично уточняется время выполнения разворота для выхода на заданный курс:

$$t_{\text{разв}} = \frac{2\pi V_{\text{разв}}}{g \cdot \text{tg}\gamma}\left(\frac{\varphi}{360}\right)\cdot K_V, \quad (9)$$

где $V_{\text{разв}}$ – средняя скорость выполнения разворота.

Задача значительно усложняется при учете влияния ветра на этапе выполнения маневра для повторного захода на гон, где по завершении маневра необходимо выйти в строго определенную фиксированную точку. Для оценки влияния ветра на продолжительность выполнения маневра условно разобьем его на три этапа: набор высоты, полет в горизонтальной плоскости (разворот) и снижение (рис. 2).

Поскольку набор высоты после выхода из гона и снижение после завершения маневра выполняется практически без доворотов по прямолинейным наклонным траекториям, влияние ветра на них с достаточной степенью точности можно учесть введением коэффициента K_t в расчетную формулу

$$t_{\text{наб/сн}} = \frac{\Delta H}{V_y} K_t, \quad (10)$$

где K_t определяется по формуле (6) для

$$V = V_{\text{наб}}\cos\theta. \quad (11)$$

Рассмотрим влияние ветра на время выполнения маневра в горизонтальной плоскости. На рисунках показана траектория выполнения маневров относительно воздуха при разворотах против ветра и в штиль (рис. 3, *а*) и по ветру (рис. 3, *б*).

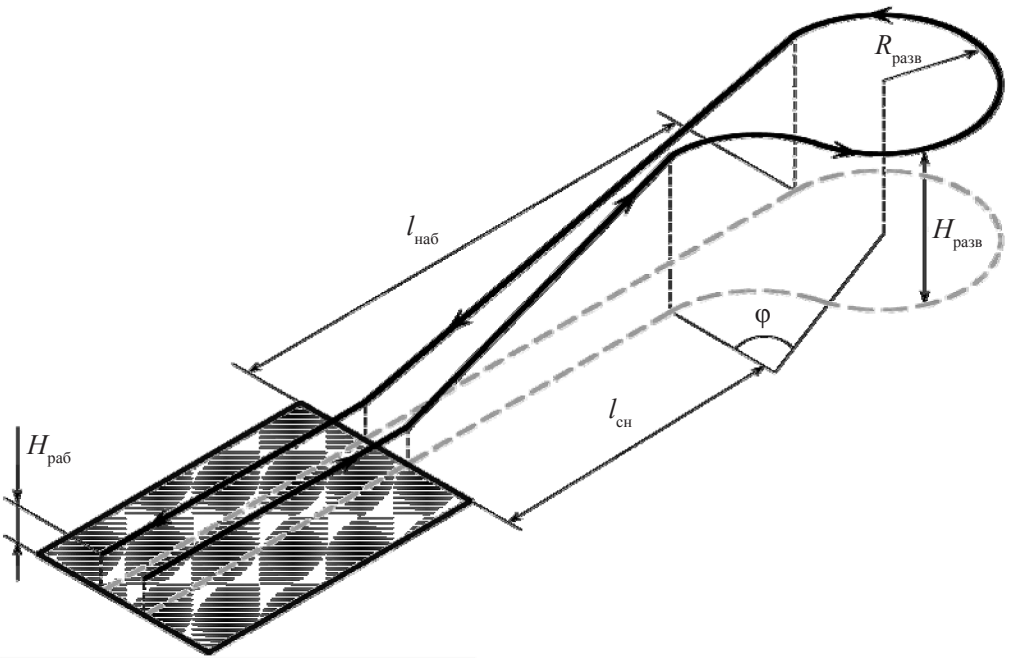


Рис. 2. Элементы маневра самолета Ан-2 для повторного захода на гон

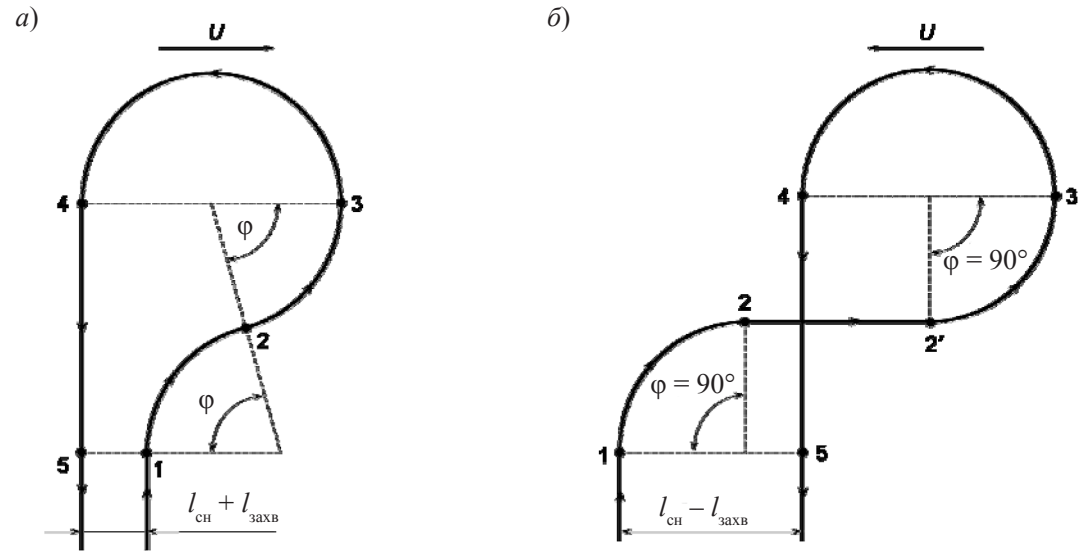


Рис.3. Траектория выполнения маневра для повторного захода на гон относительно воздуха при разворотах: *а* – против ветра и в штиль; *б* – по ветру

При этом предполагается, что угол φ может изменяться в интервале от 0 до 90°. В допустимом диапазоне изменение силы ветра для компенсации его влияния (сноса) с целью выхода на заданную точку при развороте против ветра достаточно изменить величину угла отворота φ, а при развороте по ветру практически во всех случаях необходимо пролететь некоторое время в сторону, противоположную развороту (участок 2-2').

Время выполнения маневра в штилевых условиях определяется по формуле:

$$t_{полн} = \frac{2\pi V_{разв.ср}}{g \cdot \mathrm{tg}\gamma}\left(\frac{180 + 2\varphi}{360}\right) + \frac{2R\sin\varphi}{V_{разв.ср}}, \quad (12)$$

где первое слагаемое определяет время полета на участке 1-4, а второе – на участке 4-5. Для упрощения расчетов принято, что $V^{1\text{-}4} = V^{4\text{-}5} = V_{разв.ср}$, и угол φ включает в себя угол, равный 20°, который самолет пролетит при переходе из правого виража в левый, что практически не оказывает влияние на точность расчета. Следовательно,

$$\varphi = \arccos\frac{l_{захв}}{2R}, \quad (13)$$

где $l_{захв}$ – ширина рабочего захвата.

При выполнении маневра в условиях воздействия бокового ветра время маневра определяется по формулам:

$$t^{U}_{полн} = \frac{2\pi V_{разв}}{g \cdot \mathrm{tg}\gamma}\left(\frac{180 + 2\varphi}{360}\right) + \frac{2R\sin\varphi}{\sqrt{V^2 - U^2}}, \quad (14)$$

где $$\varphi = \arccos\frac{l_{сн} + l_{захв}}{2R} = \arccos\frac{t^{U}_{пол}U + l_{захв}}{2R} \quad (15)$$

при $\varphi \le 90°$

или

$$t^{U}_{полн} = \frac{2\pi V_{разв}}{g \cdot \mathrm{tg}\gamma} + \frac{2R}{\sqrt{V^2 + U^2}} + \frac{l_{сн} - l_{захв}}{V + U}, \quad (16)$$

где l – величина сноса;

$$l_{сн} = t^{U}_{полн}U, \text{ при } \varphi > 90°. \quad (17)$$

Расчет времени выполнения разворота ведется методом последовательных приближений. В качестве первого приближения при определении угла отворота φ или величины сноса $l_{сн}$ берется время полета в штиль по формуле (12). В общем случае на самолет действует ветер, направленный под некоторым углом x к направлению полета. Для рассмотрения этого общего случая разложим вектор скорости ветра на две составляющие: боковую $U_x = U\sin x$ и продольную $U_y = U\cos x$ (рис. 4), и рассмотрим сложное движение воздушного судна.

Предполагая, что влияние составляющей U_y компенсируется летчиком только на участке 4-5, получим изменение времени полета за счет ее воздействия:

$$\Delta t^{U_y}_{пол} = \frac{t^{U_x}_{пол} \cdot U\cos x}{V_{разв.ср}}. \quad (18)$$

В общем случае зависимости (13)–(16) имеют следующий вид:

$$t^{U}_{полн} = \left(1 + \frac{U\cos x}{V_{разв.ср}}\right) \times \left[\frac{2\pi V_{разв.ср}}{g \cdot \mathrm{tg}\gamma}\left(\frac{180 + 2\varphi}{360}\right) + \frac{2R\sin\varphi}{\sqrt{V^2_{разв.ср} - U^2\sin^2 x}}\right], \quad (19)$$

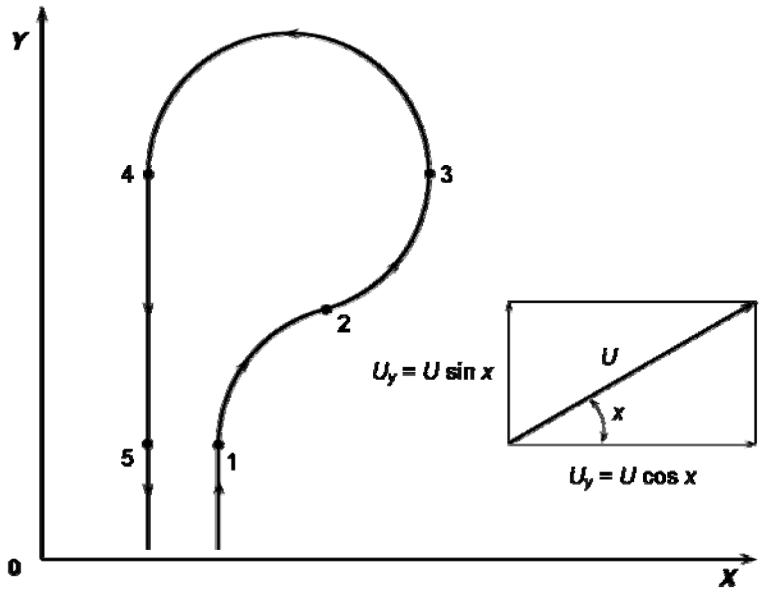


Рис. 4. Разложение вектора скорости ветра на составляющие

где $\varphi = \arccos \dfrac{t^{U}_{\text{пол}} \cdot U \sin x + l_{\text{захв}}}{2R}$ при $\varphi_{\text{потр}} \le 90°$;

$$t^{U}_{\text{полн}} = \left(1 + \frac{U \cos x}{V_{\text{разв.ср}}}\right) \times \times \left[\frac{2\pi V_{\text{разв.ср}}}{g \cdot \text{tg}\gamma} + \frac{2R}{\sqrt{V^2_{\text{разв.ср}} + U^2 \sin^2 x}} + \frac{l_{\text{сн}} - l_{\text{захв}}}{V + U}\right], \quad (20)$$

где $l_{\text{сн}} = t^{U}_{\text{пол}} U \sin x$, при $\varphi_{\text{потр}} > 90°$.

Для учета влияния ветрового режима на время выполнения маневра необходимо произвести расчет зависимости коэффициента увеличения времени от соотношения скоростей ветра и воздушного судна:

$$K_t = \frac{t^{U_{\text{ср}}}_{\text{пол}}}{t^{\text{шт}}_{\text{пол}}}; \quad (21)$$

$$\text{t}^{U_{\text{ср}}}_{\text{пол}} = \frac{1}{n} \int_0^{360} \Phi dx, \quad (22)$$

где Ф – равно $t^{U}_{\text{полн}}$ из выражения (19) при $\varphi \le 90°$ и равно $t^{U}_{\text{полн}}$ из выражения (20) при $\varphi > 90°$.

Таким образом,

$$K_t = \frac{\frac{1}{n}\int_0^{360} \Phi dx}{t^{\text{шт}}_{\text{пол}}}. \quad (23)$$

Вычисление ведется методом численного интегрирования для фиксированных соотношений скоростей ветра и воздушного судна по формулам (19) и (20). В вычислениях $t^{U}_{\text{полн}_i}$ используется метод последовательных приближений с заранее оговоренной точностью ε.

Время выполнения маневра для повторного захода на гон определяется по формуле:

$$t_{\text{ман}} = K^1_t \left(\frac{\Delta H}{V^y_{\text{наб}}} + \frac{\Delta H}{V^y_{\text{сн}}} + t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}\right) + + K^2_t \left(\frac{2\pi V_{\text{разв.ср}}}{g \cdot \text{tg}\gamma}\left(\frac{180 + 2\varphi}{360}\right) + \frac{2R \sin \varphi}{V_{\text{разв.ср}}}\right), \quad (24)$$

где ΔH – перепад высот разворота и полета на гоне; $V^y_{\text{наб}}$, $V^y_{\text{сн}}$ – вертикальные скорости набора и снижения; $t_{\text{вх}}$, $t_{\text{вых}}$ – время захода на гон и выхода из него; K^1_t, K^2_t определяются для ожидаемого соотношения U и V по формулам (6) и (23) соответственно.

Полученный по результатам расчета набор времени для выполнения первичных составляющих элементов полета можно сгруппировать в нормативы, которые логично отражают основные этапы полета воздушного судна.

Данные нормативы можно составить отдельно для каждого способа АРВ и БО во всем рабочем диапазоне высот для этапов перелета и полета над полем. Такие нормативы времени могут быть использованы не только для планирования и отчета, но и для контроля над соблюдением технологии полета при проведении АРВ и БО путем сравнения нормативного времени с фактически затраченным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондаренко, В.А.** Инновационные процессы в авиационно-химических работах – экологический аспект [Текст]/В.А. Бондаренко, Р.Т. Абдрашитов, К.Ю. Дибихин [и др.].–Оренбург: ОГУ, 1998.–200 с.

УДК 681.3

А.С. Катасёв, Д.Р. Газимова

МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В ПАРТНЕРСКИХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМАХ

В настоящее время для решения большого количества неформализованных и плохо формализованных задач в различных предметных областях человеческой деятельности успешно применяются экспертные системы. В своем развитии они прошли путь от простых статических систем поддержки принятия решений до нечетких, мягких и партнерских экспертных систем [2].

Основное отличие нечетких систем от мягких состоит в том, что последние содержат встроенные механизмы автоматизированного формирования баз знаний на основе методов интеллектуального анализа данных. Именно поэтому мягкие экспертные системы называют *адаптивными системами нечеткого логического вывода*.

Партнерские экспертные системы, кроме того, способны не только к адаптации к накопленным в предметной области данным и формированию своей базы знаний, но и к ее оптимизации, выбору лучшей модели представления знаний в зависимости от особенностей предметной области, а также к построению модели пользователя и ведению диалога с ним.

Актуальной задачей при разработке экспертных систем, в целом, и партнерских систем, в частности, была и остается задача поиска эффективной модели представления экспертных знаний.

В данной статье предлагается инвариантная нечетко-продукционная модель представления знаний, описывается алгоритм нечеткого логического вывода на данной модели, показывается ее эффективность.

Проблема представления знаний

Существует множество формальных моделей представления знаний, среди которых большое распространение получили правила продукций из-за гибкости описания с их помощью знаний и закономерностей предметной области, а также простоты реализации процедуры вывода.

Во время функционирования экспертной системы на ее вход подаются исходные данные (факты), сопоставляемые с антецедентами продукционных правил, каждое из которых формирует собственный выходной результат. Каждый цикл работы процедуры вывода завершается получением решения задачи либо формированием новых фактов.

Известно, что исходные данные (факты) часто характеризуются различной природой и измерены в различных шкалах [6]:

количественные (непрерывные, дискретные);

качественные (порядковые, номинальные, бинарные).

Кроме того, исходные данные могут быть как абсолютно четкими, так и нечеткими, неточными, неопределенными. При этом ни одна из существующих в настоящее время продукционных моделей представления знаний не способна одновременно работать со всеми типами данных.

Так, в традиционных правилах продукций используются только четкие входные значения, приводящие к формированию четкого выходного результата. Причем, отсутствие части исходных данных делает невозможным осуществление логического вывода в целом.

Пример простого продукционного правила:

$$\text{ЕСЛИ}\ \ x = A\ \ \text{И}\ \ y = B\ \ \text{ТО}\ \ z = C.$$

Здесь при отсутствии значений хотя бы одной из входных переменных x или y невозможно получить значение выходной переменной z.

Для снятия данного ограничения можно использовать различные модели нечетких продукций, примером которых является модель вида:

ЕСЛИ x есть $\widetilde{A}$ И y есть $\widetilde{B}$ ТО z есть $\widetilde{C}$.

В таких моделях даже при отсутствии части исходных данных возможно получение выходного результата, но с меньшей достоверностью. Однако даже в этом случае их применение ограничено классом решаемых задач, таких, как «количественный вход – бинарный выход», «нечеткий вход – четкий выход», «четкий вход – нечеткий выход» и т. п.

Поэтому для повышения эффективности использования экспертных систем актуальна разработка инвариантной к предметной области нечетко-продукционной модели представления знаний для описания процессов и закономерностей на множестве разнотипных данных.

Инвариантная модель представления знаний

В основу инвариантной модели представления знаний положена нечетко-продукционная модель, предложенная в [1] для решения задач повышения нефтедобычи. Данная модель оказалась достаточно эффективной, по сравнению с другими продукционными моделями, из-за использования в ней весовых коэффициентов важности ограничений в антецедентах, а также коэффициента достоверности правила в целом.

Однако ее пригодность ограничивалась классом задач, в которых по известному распределению значений входных количественных параметров необходимо выбрать четкое решение из множества допустимых альтернатив за один цикл работы машины логического вывода [7].

Предлагаемая в настоящей статье инвариантная нечетко-продукционная модель представления знаний свободна от указанных ограничений и может быть формализована в следующем виде:

«ЕСЛИ X_1 есть $\vec{\vec{A}}_1$ (w_1, *dtl*) И
X_2 есть $\vec{\vec{A}}_2$ (w_2, *dtl*) И
...
X_n есть $\vec{\vec{A}}_n$ (w_n, *dtl*)
ТО Y есть $\vec{\vec{B}}$ (*dtl*, *opt*)» [*CF*].

Здесь X_i $(i=\overline{1,n})$ – входные параметры правила; Y – выходной. Причем, и входы, и выходы могут быть как четкими, так и нечеткими, что показано символом «↔» над ограничениями $\vec{\vec{A}}_i$ и $\vec{\vec{B}}$ в антецедентах и консеквенте соответственно. Кроме того, выход каждого правила может быть конкретным решением задачи, а также новым фактом, поступающим в базу данных на следующем цикле работы машины логического вывода, что позволяет реализовать стратегию «поиск в глубину».

Веса $w_i \in [0,1]$ определяют степень важности условий в правиле, а коэффициент $CF \in [0,1]$ – его достоверность, что придает большую гибкость нечетким продукциям при описании предметной области. Значения данных параметров определяются экспертом.

Как для входных, так и для выходного параметров определены метки типов данных *dtl* (*data type label*), принимающие одно из значений:

b (*binary*) – бинарный;

n (*nominal*) – номинальный;

s (*serial*) – порядковый;

q (*quantitative*) – количественный.

Кроме того, в зависимости от целеуказания, в процессе логического вывода консеквенту присваиваются метки *opt* (*output parameter type*):

f (*fact*) – новый факт;

d (*decision*) – решение задачи.

На этапе формирования правила поле *opt* может оставаться пустым.

Отметим, что параметры с бинарными, номинальными и порядковыми значениями могут быть только четкими, а параметры с количественными значениями – как четкими, так и нечеткими величинами.

Алгоритм нечеткого логического вывода

В основе работы алгоритма нечеткого логического вывода на инвариантной нечетко-продукционной модели представления знаний используются значения следующих оценок:

R (*response*) – оценка срабатывания условий правила;

T (*trust*) – оценка доверия к принятому решению;

CF (*certainty factor*) – оценка достоверности правила;

V (*validity*) – оценка достоверности новых фактов;

C (*complex*) – комплексная оценка достоверности консеквента.

Рассмотрим правила расчета значений каждой из оценок.

Пусть $\mu_{\vec{A}_i}(x_i^*)$, $(i=\overline{1,n})$ – степени принадлежности входных значений $x_i^* \in X_i$ ограничениям $\vec{\vec{A}}_i$

(степени срабатывания условий правила). Тогда *оценка срабатывания условий правила R* будет определять взвешенную сумму степеней срабатывания всех условных частей данного правила:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_{\tilde{A}_i}(x_i^*)\, w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}.$$

Следует отметить, что для различных типов входных параметров степени принадлежности будут иметь различные области значений:

для количественного параметра

$$\mu_{\tilde{A}_i}(x_i^*) \in [0,1];$$

для всех других типов параметров

$$\mu_{A_i}(x_i^*) = \begin{cases} 0, & x_i^* \neq A_i, \\ 1, & x_i^* = A_i \end{cases}.$$

Если по каким-то причинам значение входного параметра в правиле отсутствует или не может быть определено, то степень принадлежности $\mu_{\tilde{A}_i}(x_i^*)$ полагается равной нулю.

Разобьем множество весовых коэффициентов w_i на два непересекающихся подмножества:

$$w_i = w_{known} \cup w_{unknown},$$

где w_{known} – веса параметров, значения которых определены (количество параметров обозначим n_1); $w_{unknown}$ – веса параметров, значения которых не определены (количество параметров обозначим n_2). Причем $\sum_{i=1}^{n} w_i = \sum_{known=1}^{n_1} w_{known} + \sum_{unknown=1}^{n_2} w_{unknown}$, $n_1 + n_2 = n$.

Тогда расчет значения *оценки доверия к принятому решению* $T \in [0,1]$ производится следующим образом:

$$T = \frac{\sum_{known=1}^{n_1} w_{known}}{\sum_{i=1}^{n} w_i} = 1 - \frac{\sum_{unknown=1}^{n_2} w_{unknown}}{\sum_{i=1}^{n} w_i}.$$

Оценка достоверности правила $CF \in [0,1]$ определяет степень уверенности эксперта в универсальности данного правила. При $CF = 0$ эксперт полностью неуверен в сформированном правиле и возможности его практического использования. Значение $CF = 1$ указывает на абсолютную уверенность эксперта в достоверности правила.

Необходимость использования *оценки достоверности новых фактов V* вызвана тем, что, в отличие от исходных данных $x_i^* \in X_i$, достоверность которых считается равной единице, дополнительные факты, продуцируемые машиной логического вывода, не всегда достоверны и не могут полностью определять выходной результат. В данном случае численное значение оценки $V \in [0,1]$ приравнивается к значению комплексной оценки достоверности консеквента.

Расчет значения *комплексной оценки* $C \in [0,1]$ производится путем перемножения значений исходных оценок: $C = R \times T \times CF \times V$.

При $C = 0$ нечеткая продукция не сможет войти во множество допустимых решений. При $C \neq 0$ она становится частью конфликтного множества правил *RCS* (*rule conflict set*) = $\{Rule_1, Rule_2, \ldots, Rule_m\}$, каждое из которых дает возможное решение задачи или новый факт.

Разобьем множество консеквентов из конфликтного множества правил на два подмножества в зависимости от типа консеквента:

$$FCS \cup DCS,$$

где *FCS* (*fact conflict set*) = $\{F_1, F_2, \ldots, F_{m_1}\}$ – конфликтное множество новых фактов; *DCS* (*decision conflict set*) = $\{D_1, D_2, \ldots, D_{m_2}\}$ – конфликтное множество возможных решений задачи.

Пусть $C_{FCS} = \{C_{F_1}, C_{F_2}, \ldots, C_{F_{m_1}}\}$ – множество комплексных оценок достоверности новых фактов, а $C_{DCS} = \{C_{D_1}, C_{D_2}, \ldots, C_{D_{m_2}}\}$ – множество оценок достоверности решений. Тогда критерием разрешения конфликта (выбор решающего правила) будет максимальная из оценок:

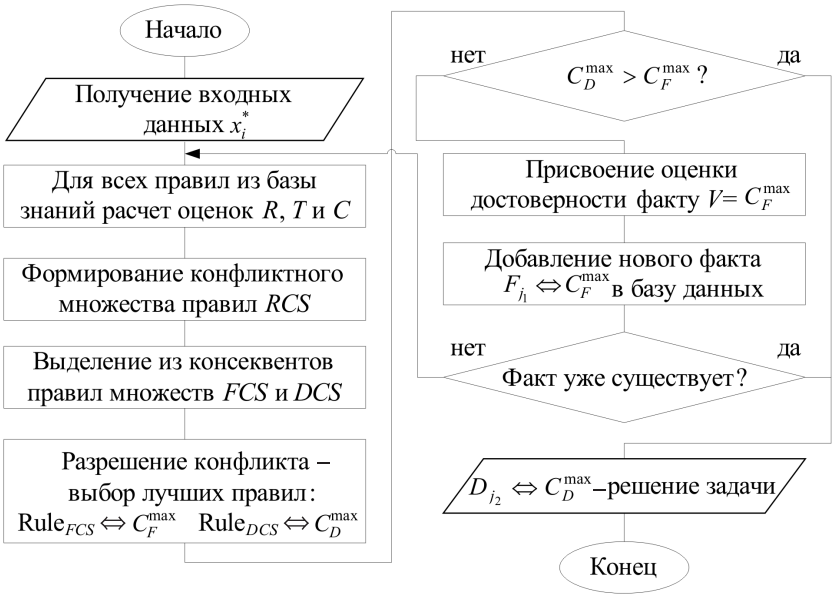
$$\text{Rule}_{FCS} \Leftrightarrow C_F^{\max} = \max_{j_1 = 1..m_1} C_{F_{j_1}},$$

$$\text{Rule}_{DCS} \Leftrightarrow C_D^{\max} = \max_{j_2 = 1..m_2} C_{D_{j_2}},$$

где $C_F^{\max}$ – максимальная комплексная оценка, соответствующая наиболее достоверному новому факту, а $C_D^{\max}$ – максимальная комплексная оценка, соответствующая наиболее достоверному решению задачи.

Тогда, если на текущем цикле работы алгоритма нечеткого логического вывода $C_F^{\max} \geq C_D^{\max}$, то выбирается новый факт F_{j_1}, соответствующий $C_F^{\max}$, запускается очередной цикл работы машины вывода и процесс поиска решения продолжается. В противном случае ($C_D^{\max} > C_F^{\max}$) выбирается наилучшее решение задачи D_{j_2}, соответствующее $C_D^{\max}$, а процесс поиска прекращается.

Однако условие $C_D^{\max} > C_F^{\max}$ может не наступить. Поэтому в алгоритме логического вывода предусмотрен дополнительный критерий прекращения поиска решения задачи – достижение



Блок-схема работы алгоритма нечеткого логического вывода

ситуации «вырожденности фактов», при которой на очередном цикле работы машины логического вывода в базу фактов поступает уже имеющийся там факт.

Отметим, что использование дополнительного критерия гарантирует сходимость алгоритма логического вывода, поскольку множество фактов является конечным (не превышает числа правил в базе знаний) и система в любом случае придет к состоянию «вырожденности фактов».

На рисунке представлена блок-схема алгоритма логического вывода на инвариантной нечетко-продукционной модели представления знаний.

Таким образом, процесс поиска решения задачи является итеративным и выполняется за конечное число шагов.

Апробация и оценка эффективности модели

Первичная апробация и оценка эффективности инвариантной модели представления знаний осуществлялась на примере решения задачи определения кредитоспособности физических лиц [4]. Использовались следующие категории факторов кредитоспособности человека [8]:

базовая персональная информация (пол, возраст, образование);

семейное положение (состояние в браке, количество детей);

регистрационная информация (прописка, срок проживания);

информация о занятости (специальность, сфера деятельности);

финансовое положение (зарплата, другие начисления и доходы);

информация по обеспеченности (имущество, ценные бумаги);

кредитная история (количество кредитов, текущие обязательства).

Видно, что решение данной задачи описывается множеством разнотипных факторов, задаваемых как количественными, так и качественными параметрами.

Авторами разработан прототип экспертной системы, основанный на использовании инвариантной модели представления знаний. В [5] приведены правила принятия решения о выдаче клиенту банковского кредита. Экспертами кредитного учреждения даны численные оценки достоверности данных правил и определены веса их входных параметров. Сформирована база знаний, состоящая из 11 правил следующего вида:

ЕСЛИ работа клиента постоянная (0.9, b) **И**
доход клиента адекватный (0.95, q) **И**
кредитный рейтинг высокий (0.8, q)
ТО одобрить кредит (b, d) [0.9].

Как видно из примера, переменные «доход клиента» и «кредитный рейтинг» являются количественными, а «вид работы» – бинарной. Выход правила также является бинарным и формирует решение задачи.

Эффективность модели представления знаний и алгоритма нечеткого вывода оценивалась по сте-

Сравнение результатов оценки кредитоспособности

Результаты / Используемые подходы	Количество принятых решений	
	Одобрить заявку	Отклонить заявку
Рекомендации экспертной системы	131	19
Решения кредитного комитета	126	24

пени соответствия результатов работы экспертной системы решаемой задаче. В таблице дана сравнительная характеристика результатов ее работы с решением кредитного комитета (на основе данных кредитной истории 150 заемщиков).

Из таблицы видно, что в большинстве случаев рекомендации экспертной системы совпадали с решениями кредитного комитета, что указывает на ее эффективность.

Таким образом, апробация экспертной системы в кредитном учреждении показала возможность практического использования инвариантной модели для представления экспертных знаний и эффективной реализации процедуры нечеткого логического вывода.

Перспективной задачей, расширяющей возможности предложенной модели и обобщающей результаты проведенного исследования, видится разработка инструментального средства для автоматизированного формирования баз знаний экспертных систем на основе нечеткой нейронной сети [3]. Данный подход в дальнейшем планируется использовать при построении интеллектуальных систем нового поколения – партнерских экспертных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Глова, В.И.** Система нечеткого моделирования для решения задач повышения нефтедобычи [Текст]/ В.И. Глова, И.В. Аникин, М.Р. Шагиахметов//Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева.–2001.–№ 3.–С. 59–61.

2. **Загоруйко, Н.Г.** Прикладные методы анализа данных и знаний. [Текст]/Н.Г. Загоруйко.–Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999.–270 с.

3. **Катасёв, А.С.** Нейронечеткая модель и программный комплекс формирования баз знаний экспертных систем [Текст]/А.С. Катасёв//Дис. … канд. техн. наук.–Казань, 2006.–20 с.

4. **Катасёв, А.С.** Интеллектуальная информационная система определения кредитоспособности физических лиц [Текст]/А.С. Катасёв, Р.И. Насыров// Информационные технологии в системе социально-экономической безопасности России и ее регионов: Сб. тр. II Всерос. науч. конф.–Казань, 2009. –С. 238–242.

5. **Муромцев, Д.И.** Введение в технологию экспертных систем [Текст]/Д.И. Муромцев.–СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2005.–93 с.

6. **Реброва, О.Ю.** Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA [Текст]/О.Ю. Реброва.–М.: Медиа Сфера, 2003.–312 с.

7. **Шагиахметов, М.Р.** Модели и комплекс программ многокритериального принятия решений в условиях неопределенности в задачах нефтедобычи [Текст]/М.Р.Шагиахметов//Дис. … канд. техн. наук. –Казань, 2004.–21 с.

8. Кредитование физических лиц [Электронный ресурс] http://www.basegroup.ru/solutions/case/credit/

УДК 681.3

И.П. Зиновьев, И.В. Аникин

МОДЕЛЬ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Активное применение информационных технологий в различных предметных областях привело к росту объемов информации, требующей анализа. Решение проблем автоматизированной обработки данных, а также поиска в них скрытых закономерностей становится необходимым.

Создаваемые при этом модели и методы могут эффективно применяться при решении задач управления, прогнозирования, принятия решений и многих др. Такие модели и методы должны справляться со следующими трудностями:

слабой формализуемостью предметной области;

значительным объемом обрабатываемой информации;

размытыми закономерностями, которым подчиняется информация;

ее неточностью, нечеткостью, качественным характером.

Создание интеллектуальных систем, которые могут работать в условиях вышеперечисленных трудностей, приобретает на сегодняшний день особую актуальность. К подобным интеллектуальным системам можно отнести нечеткие системы, которые используют при решении задач математический аппарат нечеткой логики [1] и модели нечеткого логического вывода.

Система нечеткого вывода определяет некоторую функцию от вектора входных переменных, как правило, нелинейную, и формируется из фаззификатора, дефаззификатора, механизма вывода и базы знаний [2], задающей описание отношения между вектором входов **x** и выходом y в виде продукционных правил следующего вида [2]:

$$\overset{N}{\underset{i=1}{Also}} \{R^i : If\ X_1\ is\ A_1^i\ And\ ... \\ And\ X_n\ is\ A_n^i\ Then\ Y\ is\ B^i\}. \quad (1)$$

Наиболее популярные на практике модели нечеткого вывода Мамдани [3] и Такаги–Сугено [4] не поддаются единому описанию в рамках формализма нечетких систем, т. к. по-разному трактуют обработку нечетких данных. Модель Мамдани использует продукционные правила (1), в то время как в системе Такаги–Сугено заключения правил содержат линейные функции от входных аргументов с четкими коэффициентами.

С точки зрения точности аппроксимации, системы Такаги–Сугено превосходят системы Мамдани, однако возможности языковой интерпретации продукционных правил первых ниже, чем у вторых. Поэтому актуальным представляется построение комбинированной нечеткой модели, использующей, с одной стороны, полностью лингвистические продукционные правила, а, с другой стороны, – уравнения регрессии с нечеткими коэффициентами. Такая гибридная модель (нечеткая регрессионная модель) могла бы сочетать в себе точность моделей Такаги–Сугено и прозрачность правил моделей Мамдани. Построение данной нечеткой модели влечет за собой необходимость решения следующих основных задач:

разработки общего вида правил нечеткого вывода, а также обоснованного выбора для нее основных операций – импликации, агрегирования и дефаззификации;

формулировки и доказательства теоремы о том, что предлагаемая нечеткая модель является универсальным аппроксиматором функций;

разработки алгоритма обучения нечеткой регрессионной модели;

проведения экспериментальных исследований для оценки качества работы нечеткой регрессионной модели.

Данная статья посвящена вопросу разработки гибридной модели нечеткого вывода и решению перечисленных выше задач.

Выбор операций нечеткой импликации и дефаззификации для модели нечеткого вывода

Функция нечеткой импликации $I(a, b)$ связывает предпосылки и заключения в продукционных правилах в единое отношение. Отдельные импликации объединены операцией, математически реализующей лингвистическую связку *Also* [2]. Правила вида (1) считаются классической формой для нечетких систем. Однако Мамдани в работе [3] использовал несколько иную форму:

$$Else\ \{R^i : If\ X_1\ is\ A_1^i\ And\ ... \\ And\ X_n\ is\ A_n^i\ Then\ Y\ is\ B^i\}. \quad (2)$$

Применение связки *Else* более оправданно, т. к. в механизме приближенных рассуждений мы предполагаем предпосылки правил несовместными. Эта лингвистическая конструкция может быть реализована импликацией Заде

$$I(a, b) = S(T(a, b), N(a)) \quad (3)$$

совместно с треугольными нормами как операциями агрегирования. Однако эта импликация принадлежит *QL*-классу, не удовлетворяющему определению нечеткой импликации [5].

Определение. Функция $I : [0;1] \times [0;1] \to [0;1]$ является нечеткой импликацией, если, и только если она удовлетворяет следующим трем аксиомам:

$I_1)$ $I(0, 0) = I(0, 1) = I(1, 1) = 1,\ I(1, 0) = 0,$

$I_2)$ $I(a, b) \geq I(c, d) \quad \forall a \leq c,$

$I_3)$ $I(a, b) \leq I(a, d) \quad \forall b \leq d.$

Для решения этой проблемы введем вспомогательную функцию, которую назовем *ослабленной треугольной нормой*, со следующими свойствами:

$T_1^*)\ T^*(0,0) = T^*(0,1) = T^*(1,0) = 0,\ T^*(1,1) = 1,$ (4)

$T_2^*)\ T^*(a+\delta, b) \le T^*(a,b) + \delta\ \ \forall \delta > 0,$ (5)

$T_3^*)\ T^*(a,b) \le T^*(a,d)\ \ \forall b \le d.$ (6)

Сформулирована и доказана следующая

Лемма 1. Для того чтобы функция

$$I^*(a,b) = T^*(a,b) + 1 - a \quad (7)$$

была нечеткой импликацией, необходимо и достаточно, чтобы функция T^* :[0;1] × [0;1] → [0;1] удовлетворяла условиям (4)–(6).

Потребуем соблюдения дополнительного условия

$$T_4^*)\ T^*(a,0) = 0 \quad \forall a. \quad (8)$$

Оно не нарушает условий леммы, и, вместе с этим, многие импликации из классов *S* и *R* [5] могут быть получены из (4)–(8) выбором подходящей функции T^*. Отметим, что выражение (7) является реализацией импликации (3) при выборе $T(a,b) \overset{\Delta}{=} T^*(a,b)$, $S(a,b) \overset{\Delta}{=} a+b$ и $N(a) \overset{\Delta}{=} 1-a$. Соответственно, применяя импликацию (7) совместно с агрегированием треугольными нормами, мы реализуем лингвистическую конструкцию (2).

При использовании нечетких импликаций, удовлетворяющих аксиомам I_1–I_3, заключения правил активируются даже в случае несоответствия предпосылок поданным на вход данным. Эта проблема получила название «cause 'n' effect» [6]. Математически она выражается в том, что функция принадлежности выходного нечеткого множества всюду больше нуля, или, другими словами, в возникновении «надграфика» [7]. Так как в основе многих операций дефаззификации лежит интегрирование, появление надграфика делает эти операции недопустимыми. Данную проблему предлагается решить, потребовав от операции дефаззификации выполнения следующих свойств:

$$\forall y \in (-\infty; a)\ \ \mu_C(y) = const = \gamma = \min \mu_C(y) \ \Rightarrow\ \ \bar{y} \ge a, \quad (9)$$

$$\forall y \in (b; +\infty)\ \ \mu_C(y) = const = \gamma = \min \mu_C(y) \ \Rightarrow\ \ \bar{y} \le b, \quad (10)$$

$$\forall y \in (-\infty; a]\ \ \mu_C(y) = const = \gamma = \min \mu_C(y) \ \Rightarrow\ \ \bar{y} > a, \quad (11)$$

$$\forall y \in [b; +\infty)\ \ \mu_C(y) = const = \gamma = \min \mu_C(y) \ \Rightarrow\ \ \bar{y} < b. \quad (12)$$

Модель нечеткого вывода на основе нечеткой линейной регрессии

Работа предлагаемой гибридной модели нечеткого вывода на основе нечеткой линейной регрессии представлена рисунке. В данной модели продукционные правила имеют вид (13), (14), где C_k^i – нормальные треугольные нечеткие коэффициенты. Такую модель можно считать гибридной, т. к. ее правила объединяют достоинства моделей Мамдани и Такаги–Сугено.

Фаззификатор преобразует вектор входных значений $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{x}_1, \ldots, \tilde{x}_n)$ в синглтон [4] $\tilde{\mathbf{A}} = \tilde{A}_1 \times \ldots \times \tilde{A}_n$. Каждое правило на основе уравнения нечеткой регрессии (14), композиционного правила вывода и нечеткой импликации (7) порождает соответствующее нечеткое множество $\tilde{B}^i$ (15). На основе треугольной нормы, удовлетворяющей свойству (16), производится агрегирование результатов в общее нечеткое множество *C* (17). Дефаззификатор, удовлетворяющий требованиям (9)–(12), преобразует его в итоговый результат нечеткого вывода $\bar{y}$ (18):

$$R^i: \textit{If } X_1 \textit{ is } A_1^i \textit{ And } \ldots \textit{ And } X_n \textit{ is } A_n^i \textit{ Then } Y \textit{ is } B^i, \quad (13)$$

$$B^i = C_n^i x_n + \ldots + C_1^i x_1 + C_0^i, \quad (14)$$

$$\mu_{\tilde{B}^i}(y) = \mu_{\mathbf{A}^i \to B^i}(\tilde{\mathbf{x}}, y) = I^*(\mu_{\mathbf{A}^i}(\tilde{\mathbf{x}}), \mu_{B^i}(y)), \quad (15)$$

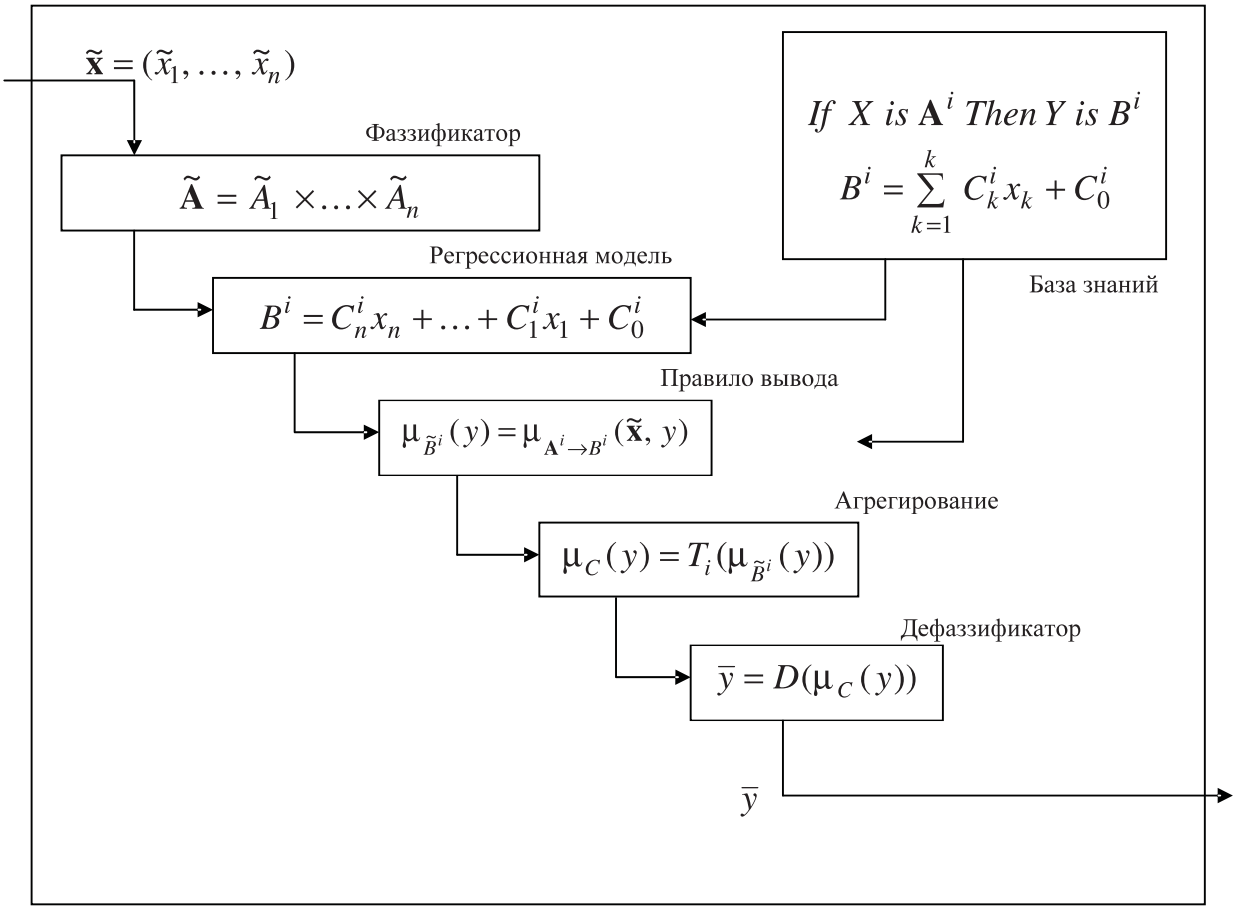
$$T(a,b) > 0 \quad \forall a, b > 0, \quad (16)$$

$$\mu_C(y) = \overset{n}{\underset{i=1}{T}} \mu_{\tilde{B}^i}(y), \quad (17)$$

$$\bar{y} = D(\mu_C(y)). \quad (18)$$

Теорема об аппроксимации и обучение разработанной модели нечеткого вывода

В 1990-х гг. было доказано несколько теорем, показывающих, что при соблюдении некоторых условий нечеткие системы способны приблизить гладкую функцию с любой заданной точностью. Однако общего утверждения подобного рода не существует: в основном эти теоремы распространяются на определенный набор операций фаззификации, импликации, агрегирования и дефаззификации. Для предлагаемой модели нечеткого вывода на основе нечеткой линейной регрессии сформулирована и доказана соответствующая теорема.



Модель нечеткого вывода

Теорема. Пусть U – компактное множество, заданное на множестве $X \subset R^n$, $g(\mathbf{x})$ – определенная на U дифференцируемая функция. Тогда $\forall \varepsilon > 0$ существует система нечеткого вывода $f(\mathbf{x})$, функционирующая согласно (4)–(18), для которой выполняется условие $\forall \mathbf{x} \in U | f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x})| < \varepsilon$.

Следует отметить, что на практике необходим алгоритмический способ получения продукционных правил, аппроксимирующих таблично-заданные зависимости между входами и выходами. Пусть в обучающую выборку входят элементы $(\mathbf{x}^j, y^j)$, $j = \overline{1, M}$, $\mathbf{x}^j = (x_1^j, \ldots, x_n^j)$. Каждая из величин x_k^j, y^j, $j = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, n}$ является вещественным числом из интервала [0;1]. Требуется построить нечеткую систему, определенную набором правил $\{R^i\}_{i=1}^N$ вида (13)–(14), которая минимизирует по всей выборке среднеквадратичное отклонение выходов $f(\mathbf{x}^j)$ от ожидаемых значений y^j:

$$E = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} (f(\mathbf{x}^j) - y^j)^2 . \qquad (19)$$

Данную задачу предлагается решать с помощью генетического алгоритма и линейного программирования [9, 10]. В генетическом алгоритме каждая особь S^l из популяции $\{S^l\}_{l=1}^L$ предлагаемого генетического алгоритма задает нечеткое разбиение пространства входов, а получившиеся в результате подобласти определяют левые части правил $\{R^{i,l}\}_{i=1}^{N^l}$:

$$R^i : If\ X_1\ is\ A_1^i\ And\ \ldots\ And\ X_n\ is\ A_n^i\ Then\ Y\ is\ B^i,$$

$$B^{i,l} = C_n^{i,l} \cdot x_n + C_1^{i,l} \cdot x_1 + C_0^{i,l}.$$

Разбиение S^l начинается с единичного гиперкуба

$$F^{0,l} = [u_1^{0,l}; v_1^{0,l}] \times \ldots \times [u_n^{0,l}; v_n^{0,l}],$$
$$u_k^{0,l} = 0, k = \overline{1, n},\ v_k^{0,l} = 1, k = \overline{1, n}$$

в пространстве входов, с которым связан вектор $\mathbf{b}^{0,l} = (b_1^{0,l}, \ldots, b_n^{0,l})$.

Разбиение описывается последовательностью $\{P^{m,l}\}_{m=1}^{N^l - 1}$ элементарных операций, каждая из которых выбирает одну из полу-

чившихся к настоящему моменту областей $F^{i^m,l} = [u_1^{i^m,l}; v_1^{i^m,l}] \times \ldots \times [u_n^{i^m,l}; v_n^{i^m,l}]$ со связанным с ней вектором $\mathbf{b}^{i^m,l} = (b_1^{i^m,l}, \ldots, b_n^{i^m,l})$, индекс координаты пространства $k^{m,l}$ и точку $t_{k^m}^{m,l}$, разделяющие $F^{i^m,l}$ на «левую» и «правую» подобласти

$$F_L^{i^m,l} = [u_1^{i^m,l}; v_1^{i^m,l}] \times \ldots [u_{k^{m,l}}^{i^m,l}; t_{k^{m,l}}^{m,l}] \times \ldots \times [u_n^{i^m,l}; v_n^{i^m,l}],$$

$$F_R^{i^m,l} = [u_1^{i^m,l}; v_1^{i^m,l}] \times \ldots [t_{k^{m,l}}^{m,l}; v_{k^{m,l}}^{i^m,l}] \times \ldots \times [u_n^{i^m,l}; v_n^{i^m,l}],$$

а также ставит им в соответствие вектора индексов

$$\mathbf{b}_L^{i^m,l} = (b_1^{i^m,l}, \ldots, b_{k^{m,l}-1}^{i^m,l}, b_L^{i^m,l}, b_{k^{m,l}+1}^{i^m,l}, \ldots, b_n^{i^m,l}),$$

$$\mathbf{b}_R^{i^m,l} = (b_1^{i^m,l}, \ldots, b_{k^{m,l}-1}^{i^m,l}, b_R^{i^m,l}, b_{k^{m,l}+1}^{i^m,l}, \ldots, b_n^{i^m,l}).$$

Такая последовательность операций может быть представлена в виде бинарного дерева, листами которого будет N^l областей, которые мы для удобства обозначим $\{F^{i,l}\}_{i=1}^{N^l}$, со связанными с ними векторами $\{\mathbf{b}^{i,l}\}_{i=1}^{N^l-1}$.

Операции генетического алгоритма над этими бинарными деревьями определяют итоговое разбиение пространства. При выполнении операции скрещивания генетического алгоритма в каждом из деревьев выбирается по одному узлу, и поддеревья, для которых эти узлы являются корнями, обмениваются. При мутации, если исходный узел является листовым, над ним проводится операция разбиения и создаются два узла-потомка, соответствующие «левой» и «правой» подобластям пространства. Если узел не является листом, то для него возможно удаление поддеревьев этого узла, либо изменение параметров разбиения этого узла.

Из листов $\{F^{i,l}\}_{i=1}^{N^l}$ могут быть получены продукционные правила $R^{i,l}$. Нечеткие множества $A_k^{i,l}$ в предпосылке и $C_k^{i,l}$ в заключении задаются функциями принадлежности:

$$\mu_{A_k^{i,l}}(x_k) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_k - a_k^{i,l}}{c_k^{i,l}} \right|^{b_k^{i,l}}}, \quad k = \overline{1,n},$$

$$a_k^{i,l} = \frac{v_k^{i,l} + u_k^{i,l}}{2}, \; k = \overline{1,n}, \quad c_k^{i,l} = v_k^{i,l} - u_k^{i,l}, \; k = \overline{1,n},$$

$$\mu_{C_k^{i,l}}(x) = \begin{cases} 1 - \dfrac{|x - d_k^{i,l}|}{w_k^{i,l}}, & |x - d_k^{i,l}| \le w_k^{i,l}, \; k = \overline{0,n}, \\ 0, & |x - d_k^{i,l}| > w_k^{i,l}, \; k = \overline{0,n}, \end{cases}$$

где параметры $d_k^{i,l}$ и $c_k^{i,l}$ – центры и ширины коэффициентов нечеткой регрессии $C_k^{i,l}$, рассчитываются индивидуально для каждого правила на основе его левой части и выборки данных $(\mathbf{x}^j, y^j)$, $j = \overline{1,M}$. Для их поиска используется модификация алгоритма нечеткой регрессии Танака и введено значение H-фактора $\in [0;1]$. Для каждого правила $R^{i,l}$ и элемента выборки $(\mathbf{x}^j, y^j)$, $j = \overline{1,M}$ рассчитывается уровень активации правила $\alpha^{i,l,j} = \mu_{A_1^{i,l} \times \ldots \times A_1^{i,l}}(x_1^j, \ldots, x_n^j)$.

Для упрощения вычислений и игнорирования малозначащих для данного правила данных, строится новая выборка:

$$(\tilde{x}^j, \tilde{y}^j)_{j=1}^{\tilde{M}} = \{(x^j, y^j),\ j \in N \cap [1; M] : \alpha^{i,l,j} < \mathrm{A},$$

где A – вещественное число из интервала [0;1].

При подаче на вход правила $R^{i,l}$ синглтона в точке $\tilde{\mathbf{x}}^j$, центр и ширина нечеткого множества $B^{i,l}$ согласно уравнению нечеткой регрессии вычисляются следующим образом:

$$d^{i,l,j} = d_0^{i,l} + \sum_{k=1}^{n} d_k^{i,l} \cdot \tilde{x}_k^j \; ; \; w^{i,l,j} = w_0^{i,l} + \sum_{k=1}^{n} w_k^{i,l} \cdot |\tilde{x}_k^j|,$$

где $d_k^{i,l}$ и $w_k^{i,l}$ – соответственно центр и ширина коэффициента $C_k^{i,l}$. Потребуем в точке $(\tilde{\mathbf{x}}^j, \tilde{y}^j)$ соблюдения модифицированного правила H-фактора:

$$\mu_{B^{i,l}}(\mathrm{y}) \ge \mathrm{H} \cdot \alpha^{i,l,j}. \qquad (20)$$

Ограничения (20) могут быть переформулированы в виде системы неравенств:

$$d_0^{i,l} + \sum_{k=1}^{n} d_k^{i,l} \cdot \tilde{x}_k^j + w_0^{i,l} \quad (1 - H \cdot \alpha^{i,l,j}) + \\ + \sum_{k=1}^{n} w_k^{i,l} \quad (1 - H \cdot \alpha^{i,l,j}) |\tilde{x}_k^j| \ge \tilde{y}^j,$$

$$d_0^{i,l} + \sum_{k=1}^{n} d_k^{i,l} \cdot \tilde{x}_k^j - w_0^{i,l} \quad (1 - H \cdot \alpha^{i,l,j}) - \\ - \sum_{k=1}^{n} w_k^{i,l} \quad (1 - H \cdot \alpha^{i,l,j}) |\tilde{x}_k^j| \ge \tilde{y}^j.$$

Коэффициенты $C_k^{i,l}$ находятся решением задачи линейного программирования:

$$\min W^{i,l}(d_1^{i,l}, \ldots, d_n^{i,l}, w_1^{i,l}, \ldots, w_n^{i,l}),$$

$$W^{i,l}(d_1^{i,l}, \ldots, d_n^{i,l}, w_1^{i,l}, \ldots, w_n^{i,l}) = \\ = w_0^{i,l} + \sum_{k=1}^{n} w_k^{i,l} \cdot \sum_{j=1}^{\tilde{M}} |\tilde{x}_k^j|, \qquad (21)$$

$$d_0^{i,l} + \sum_{k=1}^{n} d_k^{i,l} \tilde{x}_k^j + w_0^{i,l}(1 - H \cdot \alpha^{i,l,j}) + \\ + \sum_{k=1}^{n} w_k^{i,l}(1 - H \cdot \alpha^{i,l,j}) |\tilde{x}_k^j| \ge \tilde{y}^j,$$

$$d_0^{i,l} + \sum_{k=1}^{n} d_k^{i,l} \tilde{x}_k^j - w_0^{i,l}(1 - H \cdot \alpha^{i,l,j}) -$$
$$- \sum_{k=1}^{n} w_k^{i,l}(1 - H \cdot \alpha^{i,l,j}) \mid \tilde{x}_k^j \mid \le \tilde{y}^j, \qquad (21)$$
$$w_k^{i,l} \ge 0, k = \overline{0,n}.$$

После того как найдены параметры нечетких множеств в продукционных правилах, мы можем вычислить значение функции приспособленности генетического алгоритма, определенной на основе (19) и представленной в виде:

$$E(S^l) = E(f^l(\mathbf{x})) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} (f^l(\mathbf{x}^j) - y^j)^2 . \quad (22)$$

В результате работы генетического алгоритма строится система правил, определяющих работу нечеткой модели на основе нечеткой линейной регрессии.

Оценка качества работы нечеткой регрессионной модели

Для проверки эффективности разработанного алгоритма обучения, проведен сравнительный анализ предложенной нечеткой регрессионной модели и системы Мамдани-типа, обученной по методу One-Pass, на примере аппроксимации функций $f_1(x_1, x_2) = (x_1 - 0{,}5)^2 + (x_2 - 0{,}5)^2$ и $f_2(x_1, x_2) = \dfrac{x_1 + x_1 x_2}{x_1 - 2x_1 x_2 + x_2 + 2}$.

Данные алгоритма One-Pass использовались для построения девяти нечетких систем Мамдани-типа, использующих в разных комбинациях операции импликации T_m, T_p, T_{bp} [2] и операции дефазификации Center of Gravity, Middle of Maximum, Matching при мощности разбиения пространств 5 и 10. Построение девяти нечетких регрессионных моделей для аппроксимации функций f_1 и f_2 производилось для операций агрегирования T_m, T_p, T_{bp} и операций дефаззификации Center of Gravity, Middle of Maximum, Height.

В результате экспериментов получено, что для достижения сравнимой точности аппроксимации на функциях f_1 и f_2 системе Мамдани требуется около девяноста продукционных правил, в то время как предложенной системе достаточно не более восьми правил. Проведенные численные эксперименты показали большую точность нечеткой регрессионной модели по сравнению с системами Мамдани-типа.

Предложенная модель нечеткого вывода на основе нечеткой линейной регрессии применялась для формирования диагнозов пациентов с симптомами поясничного остеохондроза. Использовались данные клинического, нейро-ортопедического, рентгенокомпьютерно-томографического обследования 230 женщин в возрасте от 15 до 92 лет и 180 мужчин в возрасте от 16 до 81 года с различными симптомами поясничного остеохондроза на стационарном этапе обострения и в стадии начинающейся ремиссии. Обучение нечеткой модели и обработка данных проводились на базе кафедры реабилитологии и спортивной медицины Казанской государственной медицинской академии под руководством канд. мед. наук, доцента кафедры М.А. Подольской

Разработанный программный комплекс позволил совместно оценить 15 количественных и качественных параметров. Данная нечеткая модель показала высокий процент совпадения оценок с диагнозом опытного эксперта. Процент решений, совпавших с диагнозом врача с ошибкой не более чем в одну градацию качественного параметра, составлял в среднем более 90 % и не опускался ниже 82 % для мужчин и 85 % для женщин. По оценкам экспертов, полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности разработанной системы нечеткого вывода в области прогнозирования тяжести течения мультифакториальных заболеваний человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zadeh, L.A.** [Текст]/L.A. Zadeh, Fuzzy Sets// Information and Control.–1965.–Vol. 8.–P. 338–363.

2. **Lee, C.C.** Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. Part I, II [Текст]/C.C. Lee//IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.–1990.–Vol.20. –P. 404–435.

3. **Mamdani, E.H.** Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis [Текст]/ E.H. Mamdani//IEEE Transactions on Computers.–1977. Vol. 26.–P. 1182–1191.

4. **Takagi, T.** Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control [Текст]/T. Takagi , M. Sugeno//IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.–1985.–Vol. 15.–P. 116–132.

5. **Dubois, D.** Fundamentals of Fuzzy Sets [Текст]/D. Dubois, H. Prade //The Handbooks of Fuzzy Sets.–2000.–Vol. 7.

6. **Mendel, J.M.** Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial [Текст]/J.M. Mendel// Proc. of the IEEE. –March, 1995.–Vol. 3.–P. 345–377.

7. **Салахутдинов, Р.З.** Системы нечеткого вывода, основанные на аддитивных генераторах [Текст]/Р.З. Салахутдинов, И.П. Зиновьев//Исслед. по информатике. –2007.–Вып. 10.–Казань: Отечество. С. 57–67.

8. **Зиновьев, И.П.** Усовершенствование системы нечеткого вывода Такаги–Сугено [Текст]/И.П. Зиновьев, И.В. Аникин//Вестник Казанского ГТУ им. А.Н. Туполева.–2009.–№3.–С. 84–88.

9. **Салахутдинов, Р.З.** Об одном подходе к построению обобщенных нечетких контроллеров [Текст]/ Р.З. Салахутдинов, И.П. Зиновьев//Системный анализ в проектировании и управлении: Тр. XI Междунар. науч.-практ. конф.–СПб.: Изд–во Политехнического ун–та, 2007.–С. 40–43.

10. **Зиновьев, И.П.** Извлечение знаний в модели Такаги-Сугено с нечеткой правой частью [Текст]/ И.П. Зиновьев, И.В. Аникин//Междунар. конф. по мягким вычислениями и измерениям: Сб. докл.–СПб.: Изд–во СПБГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.–Т. 1.–С. 177–179.

УДК 535.646

Г.Ф. Малыхина, И.А. Со

РАЗРАБОТКА НОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЧЕЛОВЕКА

В цифровом телевидении актуальна задача оценки искажений цветопередачи, возникающих в результате сжатия телевизионных изображений. Необходимы критерии, по которым можно оценить ошибку цветопередачи. Цвет – воспринимаемое человеком ощущение светового потока, поэтому оценка искажений цветности должна основываться на цветовосприятии зрительной системы человека. Цветовые различия обычно выражают в порогах цветоразличения, которые были экспериментально получены рядом авторов (Мак Адам, Браун, Г.Вышецки, Г.Филдер, Стайлс) [1–4], и в целом их результаты согласуются между собой. Однако фундаментальными и наиболее точными считаются данные Мак Адама [1]. Им было измерено 25 так называемых *пороговых эллипсов* цветоразличения. В пороговом эллипсе границу эллипса составляют цвета, различающиеся на один порог от цвета, соответствующего центру эллипса.

Эллипсы представлены на цветовом графике МКО 1931 (*xy*) (рис. 1). Для наглядности представления эллипсы увеличены в 10 раз. Форма эллипсов позволяет судить о степени равноконтрастности цветового пространства. В равноконтрастном пространстве расстояние между точками, обозначающими цвета, соответствует величине их различия. Следовательно, в равноконтрастном цветовом пространстве пороговые эллипсы цветоразличения представляют собой окружности одинакового радиуса. Разброс формы и размера эллипсов на рис. 1 свидетельствует о неравноконтрастности пространства *xy* и, вследствие этого, о невозможности использовать в качестве метрики цветовых различий декартово расстояние в этом пространстве между точками, соответствующими определенным цветам. Задаче нахождения равноконтрастного пространства посвящено множество исследований, в результате которых были

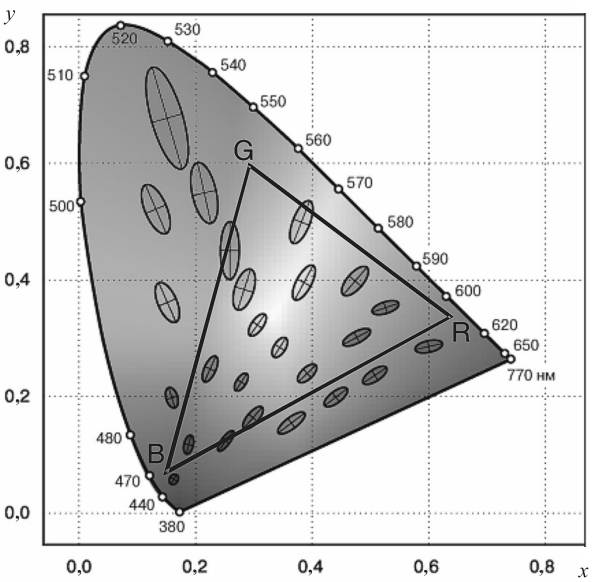


Рис. 1. Эллипсы Мак Адама, нанесенные на график МКО 1931 г . Треугольник основных цветов в телевидении

предложены пространства Джадда, Мак Адама, Шредингера, Г. Вышецки и др. [4, 5]. Переход из пространства *xy* в предложенные этими авторами пространства производится по формулам преобразования цветовых координат.

Доказано, что никаким линейным и даже нелинейным преобразованием цветовых координат невозможно добиться превращения эллипсов цветоразличения в окружности одинакового радиуса [4]. «Чтобы получить идеальные окружности, необходимо использовать не плоскость, а искривленную поверхность. Эта поверхность напоминает смятую фетровую шляпу с выпуклостью посередине, гофрированную по краям, неровную и кривую на остальных участках» [4].

Существующие наиболее точные формулы преобразования цветовых координат пространства *xy* в цветовые координаты равноконтрастного пространства достаточно сложны для некоторых практических применений с ограничениями по времени обработки цветовой информации, например, для использования в измерительных приборах цветовых искажений в цифровом телевидении при условии, что вычисление должно производиться в реальном масштабе времени.

В данной статье предложена математическая модель зрительной системы человека в части цветовосприятия, которая может использоваться в методах оценки цветовых различий при их реализации в измерительных приборах. Модель решает задачу нахождения эллипса цветоразличения для любой точки цветового пространства. На рис. 1 видна некоторая закономерность изменения размера и угла поворота эллипсов. Это позволяет допустить возможность применения методов интерполяции и/или аппроксимации к исходным данным Мак Адама.

Каждый эллипс однозначно характеризуется тремя параметрами: величиной большой полуоси эллипса $R1$, величиной малой полуоси эллипса $R2$, углом Q между большой полуосью эллипса и осью x.

Суть создания модели зрительной системы заключается в построении трех поверхностей путем интерполяции и/или аппроксимации каждого параметра эллипсов цветоразличения Мак Адама.

Задача построения поверхностей была решена следующими методами.

1. Интерполяционными:

методом изгиба тонкой пластинки, или *Thin Plate Spline* (*TPS*), который является частным случаем метода интерполяции с помощью радиальных базисных функций (РБФ);

методом Шепарда, известным как *Inverse Distance Weighted* (*IDW*);

B-сплайновой интерполяцией.

2. Аппроксимационными:

B-сплайновой аппроксимацией;

бикубической аппроксимацией.

Методы интерполяции и аппроксимации. Метод изгиба тонкой пластинки (*TPS*) относится к методам интерполяции с помощью радиальных базисных функций. В методе *TPS* в качестве базисных функций выступают $c_i r_i^2 \ln r_i^2$, где $r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$, x_i, y_i – полюса интерполяции (исходные точки); c_i – числовые коэффициенты.

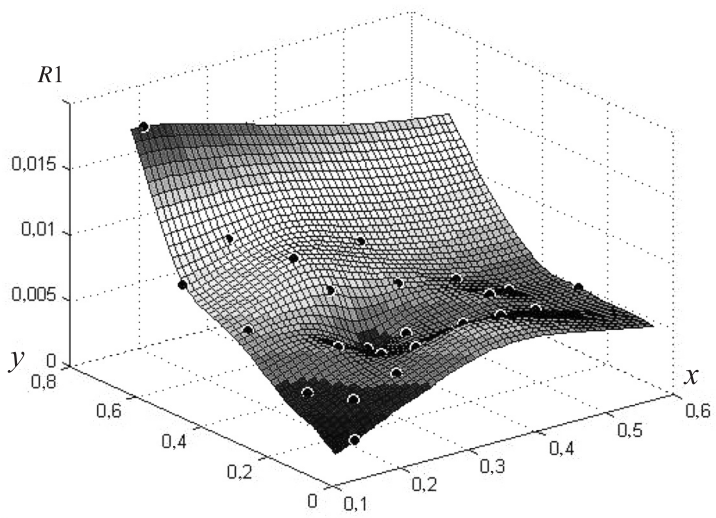


Рис. 2. Интерполяционная поверхность параметра $R1$ (метод *TPS*)

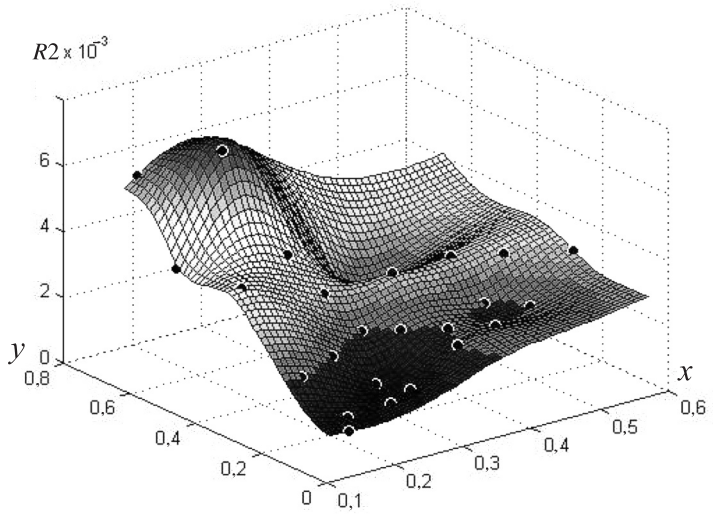


Рис. 3. Интерполяционная поверхность параметра *R*2 (метод *TPS*)

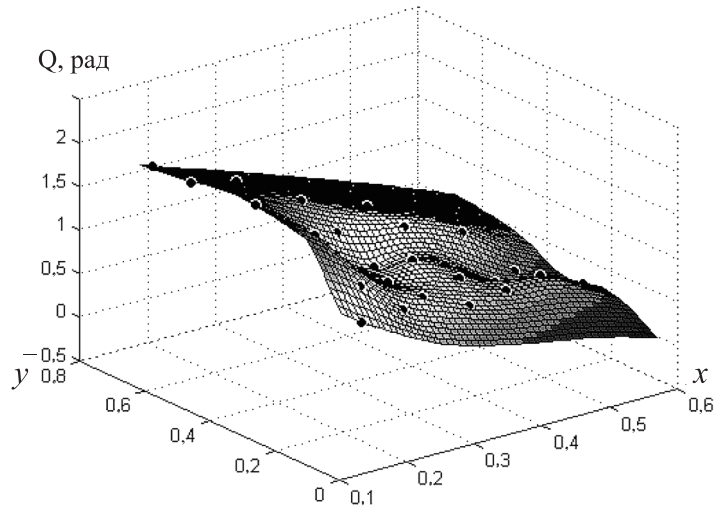


Рис. 4. Интерполяционная поверхность параметра *Q* (метод *TPS*)

На рис. 2–4 изображены интерполяционные поверхности, построенные методом *TPS*, для параметров *R*1, *R*2, *Q*. Точками обозначены исходные экспериментальные данные Мак Адама [1].

Метод Шепарда (*IDW*) основан на предположении, что на значение интерполяционной поверхности в каждой определенной точке в большей степени влияют близлежащие исходные точки и в меньшей степени – удаленные исходные точки. Интерполяция производится по формуле $S(x,y)=\sum_{i=1}^{n} w_i f_i$, где n – количество исходных точек; f_i – значения в исходных точках; w_i – весовые функции, определяемые выражением:

$$w_i = \frac{1/\left((x-x_i)^2+(y-y_i)^2\right)}{\sum_{j=1}^{n} 1/\left((x-x_j)^2+(y-y_j)^2\right)}.$$

B-сплайновая поверхность строится на основе одномерных интерполяций *B*-сплайнами, представляющими собой неортогональные базисные функции с конечным носителем, т. е. базисные функции, отличные от нуля лишь на некотором интервале.

Одномерная интерполяционная зависимость выражается суммой базисных функций $B_{j,k}$, умноженных на коэффициенты c_j. $B_{j,k}$, *j*-я базисная функция, интерполирующая исходные точки

$x_1 < ... < x_n$, порядка k на последовательности узлов t_1, ..., t_{n+k} при условии, что базисные функции $B_{j,k}(x_j) \neq 0$ для всех j, определяется рекуррентным выражением:

$$B_{j,k}(x) = \frac{x - t_j}{t_{j+k-1} - t_j} B_{j,k-1}(x) + \frac{t_{j+k} - x}{t_{j+k} - t_{j+1}} B_{j+1,k-1}(x).$$

Полюса интерполяции $\{x_j\}_{j=1, ..., n}$ и узлы $\{t_i\}_{i=1, ..., n+k}$ должны удовлетворять неравенствам $t_i < x_i < t_{i+k}$, в которых равенство допускается лишь для крайних узлов. Уравнение B-сплайновой поверхности, построенной в нашем случае по неравномерной прямоугольной сетке исходных точек с координатами $x_1 < ... < x_n$ и $y_1 < ... < y_m$, двадцать пять из которых являются данными Мак Адама, а остальные взяты из интерполяции методом *TPS*, следующее:

$$S(x,y) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j}^{m} c_{i,j} B_{i,k}(x) B_{j,k}(y). \qquad (1)$$

В работе использовались B-сплайны третьего порядка.

В случае аппроксимации B-сплайновой поверхностью, одномерные B-сплайны были построены по ограниченному набору точек для упрощения конечной формулы поверхности. При построении аппроксимирующей поверхности использовался набор исходных точек 10x10 из полного набора 25x25.

При бикубической аппроксимации уравнение поверхности ищется в виде $S(x,y) = \sum_{i=0}^{3} \sum_{j=0}^{3} a_{ij} x^i y^j$, где коэффициенты a_{ij} находятся из системы шестнадцати уравнений, составленных с учетом значений в исходных шестнадцати точках.

Оценка адекватности методов интерполяции и аппроксимации. Погрешность интерполяционных методов производилась методом группового учета аргументов [6]. После исключения по одной исходной точке производилось построение интерполяционной поверхности для оставшихся двадцати четырех точек и рассчитывалась погрешность в исключенной точке. В табл. 1 представлены характеристики относительных погрешностей в исключенных точках.

Следует обратить внимание на две особенности B-сплайновой поверхности. Во-первых, ее значения за пределами прямоугольной области определения равны нулю, т. е. B-сплайновая поверхность не позволяет произвести экстраполяцию исходных значений. Погрешность при исключении крайней точки, равна –1. Во-вторых, B-сплайновая поверхность построена на большем

Таблица 1

Оценка погрешности интерполяций методом группового учета аргументов

*R*1	Метод изгиба тонкой пластинки (*TPS*)	Метод Шепарда (*IDW*)	Интерполяция *B*-сплайнами (25x25)	
			Для всех точек	Без учета крайних точек
Среднее	0,03	0,03	–0,16	0,0002
Среднеквадратическое отклонение	0,24	0,29	0,41	0,015
*R*2				
Среднее	0,06	0,02	–0,15	0,01
Среднеквадратическое отклонение	0,39	0,29	0,41	0,03
Q				
Среднее	0,03	0,06	–0,16	0,005
Среднеквадратическое отклонение	0,16	0,34	0,41	0,02

Таблица 2

Оценка погрешностей аппроксимаций

*R*1	Аппроксимация *B*-сплайнами (10x10)	Бикубическая аппроксимация
Среднее	–0,01	–0,03
Среднеквадратическое отклонение	0,06	0,19
Максимум по модулю	0,10	0,46
*R*2		
Среднее	–0,003	–0,05
Среднеквадратическое отклонение	0,05	0,21
Максимум по модулю	0,10	0,54
Q		
Среднее	–0,01	–0,02
Среднеквадратическое отклонение	0,05	0,18
Максимум по модулю	0,09	0,50

наборе точек прямоугольной сетки (помимо исходных точек Мак Адама используются интерполированные значения, полученные методом *TPS*), и при исключении одной точки соседние с ней точки прямоугольной сетки уменьшают погрешность в исключенной точке. Поэтому малые значения погрешностей для точек, не являющихся крайними, при использовании метода группового учета аргументов для *B*-сплайновой интерполяционной поверхности, не являются показательными.

Оценка адекватности аппроксимаций произведена по относительным погрешностям в исходных точках (табл. 2).

Для оценки адекватности интерполяционных и аппроксимационных формул по величине рассчитанных погрешностей необходимо сравнить их с методической погрешностью. Методическая погрешность оценивалась по экспериментальным данным, полученным в исходных точках Мак Адама разными авторами (*P.G. Nutting* (*PGN*), *W.S. Stiles* (*WSS*), *Friele-MacAdam-Chickering* (*FMC*)), относительно данных Мак Адама [3].

Так как погрешности интерполяций в исключенных точках (см. табл. 1) и погрешности аппроксимаций в исходных точках (см. табл. 2) меньше методической погрешности (табл. 3), предложенные модели являются адекватными. Любая из полученных интерполяционных или аппроксимационных моделей цветовосприятия зрительной системы может применяться для решения практических задач измерения цветовых искажений в зависимости от требований точности и простоты реализации.

Очевидно, что интерполяционные модели являются наиболее точными, т. к. имеют нулевую погрешность в исходных точках. Однако для реализации новых методов измерения цветовых искажений на основе модели цветовосприятия в контрольно-измерительной аппаратуре цифрового телевидения могут потребоваться более простые формулы с меньшим количеством вычислений.

Просто реализуемой аппаратно и одновременно достаточно точной моделью является аппроксимация *B*-сплайнами, представляющая собой произведение полиномов второй степени по направлениям *x* и *y* на каждом прямоугольном участке, образуемом сеткой исходных точек 10 × 10. Максимальная погрешность *B*-сплайновой ап-

Таблица 3

Относительные методические погрешности

*R*1	*PGN*	*WSS*	*FMC*
Среднее	–0,49	0,93	–0,47
Среднеквадратическое отклонение	0,50	1,05	0,48
*R*2			
Среднее	–0,51	1,55	–0,48
Среднеквадратическое отклонение	0,52	1,83	0,50
Q			
Среднее	0,01	0,16	0,09
Среднеквадратическое отклонение	0,18	0,38	0,34

проксимации не превышает 10 %. Недостатком *B*-сплайновых поверхностей является их ограниченная область определения, задаваемая сеткой исходных точек, вне которой поверхность резко падает в ноль. Лишь небольшая часть треугольника основных цветов (см. рис.1), используемого в телевидении, выходит за пределы области определения поверхности. Более того, вероятность насыщенных красных цветов, соответствующих этой части треугольника, достаточно мала. Это позволяет снизить требования к точности экстраполяции, поэтому значения в этой части треугольника можно экстраполировать различными способами: принять равными константе, аппроксимировать участком плоскости, использовать значения, полученные другим методом (например, *TPS* или *IDW*), и т. д.

Поверхность определяется следующими *B*-сплайнами третьего порядка на последовательности узлов по осям *x* и *y* соответственно:

t_x = [0,131 0,131 0,131 0,155 0,1735 0,246 0,3245 0,367 0,4325 0,501 0,596 0,596 0,596];

t_y = [0,057 0,057 0,057 0,1775 0,26 0,2835 0,292 0,3115 0,3365 0,4355 0,68 0,68 0,68].

Коэффициенты из выражения (1) следующие:

$$c_{i,j} = \begin{Bmatrix} 0{,}0014 & 0{,}0027 & 0{,}0038 & 0{,}0050 & 0{,}0053 & 0{,}0056 & 0{,}0060 & 0{,}0071 & 0{,}0079 & 0{,}0190 \\ 0{,}0016 & 0{,}0030 & 0{,}0040 & 0{,}0052 & 0{,}0055 & 0{,}0058 & 0{,}0062 & 0{,}0073 & 0{,}0079 & 0{,}0190 \\ 0{,}0021 & 0{,}0037 & 0{,}0044 & 0{,}0056 & 0{,}0058 & 0{,}0061 & 0{,}0064 & 0{,}0076 & 0{,}0084 & 0{,}0189 \\ 0{,}0033 & 0{,}0049 & 0{,}0057 & 0{,}0064 & 0{,}0065 & 0{,}0066 & 0{,}0068 & 0{,}0080 & 0{,}0096 & 0{,}0184 \\ 0{,}0050 & 0{,}0061 & 0{,}0050 & 0{,}0040 & 0{,}0036 & 0{,}0034 & 0{,}0030 & 0{,}0082 & 0{,}0112 & 0{,}0173 \\ 0{,}0060 & 0{,}0078 & 0{,}0050 & 0{,}0052 & 0{,}0051 & 0{,}0049 & 0{,}0048 & 0{,}0063 & 0{,}0108 & 0{,}0163 \\ 0{,}0064 & 0{,}0081 & 0{,}0045 & 0{,}0051 & 0{,}0053 & 0{,}0055 & 0{,}0059 & 0{,}0067 & 0{,}0092 & 0{,}0155 \\ 0{,}0060 & 0{,}0067 & 0{,}0054 & 0{,}0060 & 0{,}0062 & 0{,}0064 & 0{,}0062 & 0{,}0057 & 0{,}0088 & 0{,}0147 \\ 0{,}0051 & 0{,}0055 & 0{,}0044 & 0{,}0047 & 0{,}0047 & 0{,}0046 & 0{,}0046 & 0{,}0043 & 0{,}0087 & 0{,}0139 \\ 0{,}0046 & 0{,}0049 & 0{,}0048 & 0{,}0050 & 0{,}0050 & 0{,}0050 & 0{,}0050 & 0{,}0050 & 0{,}0084 & 0{,}0137 \end{Bmatrix}$$

В результате проведенной работы получены эллипсы цветоразличения в каждой точке цветового пространства *xy* методами интерполяции и аппроксимации наиболее достоверных экспериментальных данных Мак Адама [1].

Можно сделать следующие выводы:

погрешность предложенных моделей цветовосприятия не превышает методической погрешности, рассчитанной по данным других исследователей;

методы оценки искажений целесообразно строить на основе модели цветовосприятия зрительной системы человека;

по итогам сопоставления погрешностей различных моделей и простоты их аппаратной реализации сделано заключение о целесообразности использования *B*-сплайновой аппроксимации в контрольно-измерительном оборудовании цифрового телевидения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **MacAdam, D.L.** Visual Sensitivies to Color Differences in Daylight [Текст]/D.L. MacAdam//J. Opt. Soc. Am.–May 1942.–Vol. 32.–№ 5.

2. **Stiles, W.** A modified Helmholtz line element in brightness-colour space [Текст]/W. Stiles//Proc. Phys. Soc. London.–1946. –Vol.58. –P.41.

3. **Wyszecki, G.** New color-matching ellipses [Текст]/G. Wyszecki, G. Fielder//J. Opt. Soc. Am.–1971. –Vol.61, –P1135.

4. **Джадд, Д.** Цвет в науке и технике [Текст]/Д. Джадд, Г. Вышецки.–М.: Мир, 1978.

5. **Ложкин, Л.Д.** Анализ и разработка систем объективной колориметрии в цветном телевидении: дис. … канд. техн. наук [Текст]/Л.Д. Ложкин.–Самара, 2009.

6. **Васильев, А.Н** Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения [Текст]/А.Н. Васильев, Д.А. Тархов.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.–528 с.

УДК 624.07;69.07;51-74

В.В. Белов, Ю.Я. Болдырев, Д.В. Климшин, А.С. Шанина

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

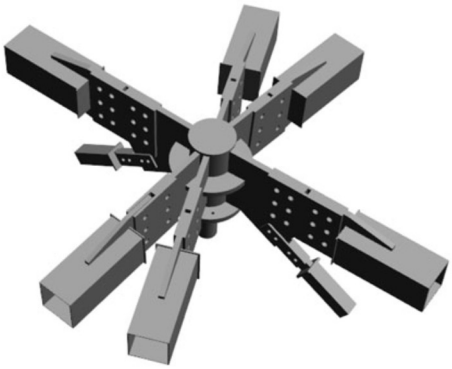
Металл, как материал для возведения сооружений, используется человечеством уже давно. Соответственно, методики расчета и проектирования металлических конструкций достаточно развиты и имеют давнюю историю [2].

Современный расчет подобных сооружений наиболее часто производится в пространственной постановке на основе так называемых *балочных моделей* (моделей, в которых элементы конструкции моделируются стержневыми элементами). Проектировщик разрабатывает расчетную модель, производит сбор нагрузок, определяет закрепления и проводит расчет, в результате которого программная система подбирает для каждого элемента конструкции наихудшее сочетание нагрузок и определяет коэффициент использования материала. Данный процесс существенно автоматизирован и не представляет особой сложности для проектировщика [1].

Несмотря на это, существует ряд ограничений и допущений, существенно влияющих на ход проектирования металлических конструкций. В частности, в строительной механике узел металлической конструкции можно спроектировать либо жестким (передача всех усилий), либо шарнирным (передаются только силы). Данная градация оправдана для большинства металлических сооружений и связана со стремлением построить конструкцию с максимальным разумным запасом. При этом надо понимать, что любой реальный узел металлической конструкции (рис. 1) обладает некоей конечной жесткостью во всех направлениях, что не учитывается в моделях современного проектирования.

Кроме того, пространственная балочная модель конструкции учитывает все стержни, сходящимися в идеальную точку. В реальной конструкции в этой точке располагается узел, иногда достаточно массивный, чтобы оказывать влияние на соседние элементы (см. рис. 1).

Само понятие металлической конструкции включает не только конструктивную форму, но и технологию изготовления, расчет и проектирование узлов, а также способы монтажа. Данные



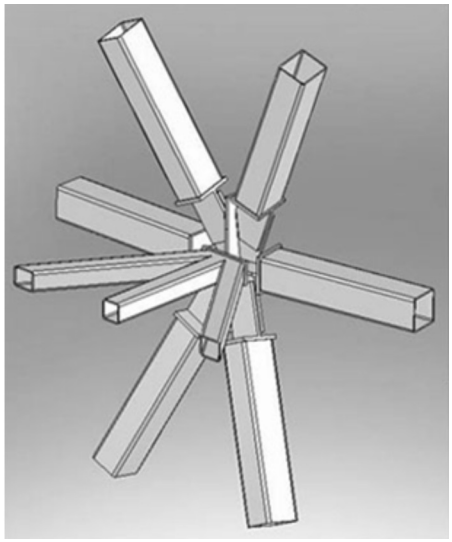


Рис. 1. Примеры узлов металлических конструкций

вопросы детально проработаны и изучены применительно к стандартным конструкциям. При проектировании уникальных и технически сложных конструкций (по классификации нормативных документов) самым трудным является выбор конструктивной схемы, а также методов доставки и монтажа конструкции.

Применение современных технологий математического моделирования позволяет в разумные сроки перебрать несколько вариантов конструктивных схем сооружения, в пространственной постановке смоделировать напряженно-деформированное состояние узлов, проанализировать вопрос устойчивости конструкции, а также разработать несколько вариантов монтажа, в зависимости от погодных условий, рельефа местности и т. д. [3]. В итоге может быть построена оптимальная конструкция сооружения. При этом следует отметить, что понятие оптимальности металлических конструкций не имеет четких критериев и определений. В рамках нормативных документов используются понятия прочности и надежности сооружения при минимальном использовании материала. При этом конструктивная схема здания почти всегда определяется заказчиком. В данном случае (уникального сооружения) оптимальность определяется комплексом мероприятий, в который входят:

анализ мирового опыта проектирования и эксплуатации подобных сооружений и выбор наиболее эффективной схемы;

проведение расчета конструкции в нескольких расчетных комплексах;

учет при проектировании сложности и стоимости монтажа, а также текущего технологического уровня развития сварных технологий при производстве узлов конструкции.

Пример проектирования уникальной металлической конструкции с применением современных вычислительных возможностей – металлический купол диаметром 127 м для склада мергеля цементного завода.

В России подобных металлических куполообразных конструкций, реализованных по данной схеме, не существует, что автоматически выводит эту конструкцию на уровень уникальных объектов, требующих тщательного и взвешенного подхода.

Исключение составляет единственный купол диаметром 102 м. Кроме того, имеется негативный опыт: ранее построенный купол диаметром 230 м, рухнул из-за неточности сборки, больших снеговых нагрузок и перепада температур от – 32° до + 3° за одни сутки.

Зима 2009–2010 гг. с обильным количеством осадков показала, что для полноценного анализа поведения конструкции требуются более серьезные методики расчета и учета нагружений. Обрушение «Трансвааль Парка» в 2004 г. в очередной раз подтвердило, что эффективное, не ограничивающее свободу творчества архитектора решение задач обеспечения надежности и безопасности уникальных сооружений возможно только силами квалифицированных специалистов-расчетчиков с применением современных математических моделей и численных методов, реализованных

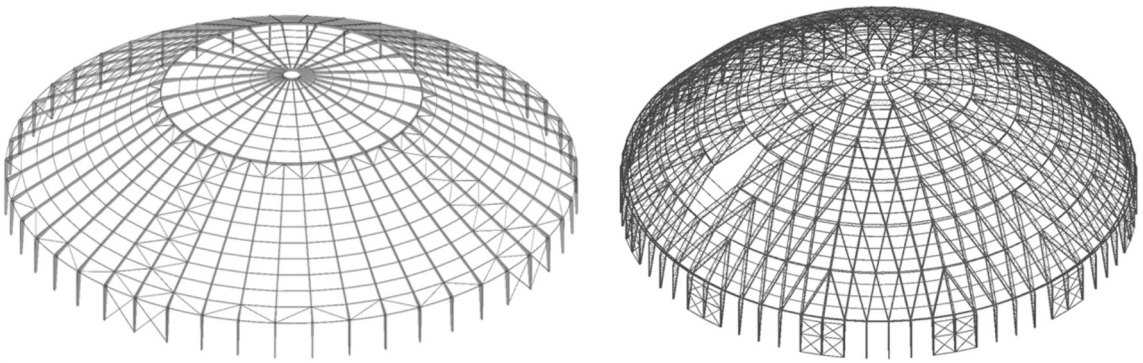


Рис. 2. Ребристо-кольцевая схема и схема Кайвита

в программных комплексах. Такие математические модели должны сопровождать объекты на всех этапах их жизненного цикла (проектирования, строительства, эксплуатации, ремонта и реконструкции), обеспечивая адекватный анализ и прогноз их состояния в составе информационно-диагностических систем мониторинга.

Одна из наиболее экономичных форм покрытий зданий больших площадей – купола. При различных очертаниях и конструктивных формах они позволяют обеспечить наименьший расход материалов по сравнению с другими конструкциями.

Переходя к анализу проектирования описываемой конструкции, следует начать с выбора конструктивной схемы. Наиболее распространенная схема подобных куполов – ребристо-кольцевая. Она характеризуется явно выраженными несущими ребрами и кольцами. Первоначальная расчетная ребристо-кольцевая модель купола была разработана в системе SCAD. Расчетная металлоемкость конструкции составила порядка 2600 т (рис. 2, слева).

Проведенный анализ мирового опыта проектирования большепролетных куполов показал, что наименее металлоемкой (теоретически) является схема Кайвита. Расчетная металлоемкость конструкции по данной схеме составила порядка 1600 т (рис. 2, справа).

К основным положительным свойствам схемы Кайвита можно отнести, например, отсутствие сгущения элементов в центральной части, что представляет определенное преимущество по сравнению с некоторыми другими схемами. Конструкция состоит из нескольких секторов, каждый из которых равномерно разбит на треугольные ячейки. Наиболее известный купол, построенный с применением той же конструктивной схемы, находится в г. Хьюстон, США (рис. 3). Так как высота всех элементов каркаса одинакова, при использовании данной схемы стало возможным достичь почти равномерного распределения собственного веса.

Осуществленный в Хьюстоне сетчатый купол с точки зрения работы его элементов является удачной конструкцией, т. к. все без исключения

Рис. 3. Купол над стадионом «Астродом» в г. Хьюстон

элементы воспринимают действующие на купол нагрузки. Экономия стали при переходе на данную схему рассматриваемого купола диаметром 127 м составила 1000 т, что в пересчете на цену закупки, изготовления и монтажа составляет около 100 млн руб. Однако с точки зрения конструктивных решений узлы сопряжений элементов купола весьма сложны, требуют высокой точности изготовления и сборки.

Уникальная сложность узлов и монтажа конструкции диктуют применение соответствующих технологий моделирования при проектировании сооружения. В данном случае нами использовался программный комплекс ANSYS.

Для исследования напряженно-деформированного состояния конструкции в среде ANSYS была построена конечно-элементная балочная модель металлического каркаса купола. Материал каркаса – сталь С245 (E = 195 ГПа, ν = 0,3, ρ = 7850 кг\м^3, α = 1e–5 мкК-1). Металлические части каркаса моделировались с помощью балочных элементов BEAM188 из стандартной библиотеки ANSYS в линейной постановке.

Элемент BEAM188 построен на основе балки Тимошенко, пригоден для моделирования прямых балочных конструкций, имеющих умеренное соотношение длины и толщины. В элементе учитываются эффекты касательных (сдвиговых) деформаций.

Элемент BEAM188 является линейным (с двумя узлами) пространственным балочным элементом. Имеет шесть или семь степеней свобод в каждом узле. Пригоден для линейных, а также для нелинейных задач с большими поворотами и (или) большими деформациями. Этот элемент может использовать поперечные сечения, соответствующие реальным профилям.

В нашей задаче с помощью функций создания поперечного сечения были созданы профили, отражающие реальные элементы металлического каркаса.

В соответствии со СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия», расчет конструкций по предельным состояниям первой и второй групп следует выполнять с учетом неблагоприятных сочетаний нагрузок и соответствующих им усилий. Эти сочетания устанавливаются из анализа реальных вариантов одновременного действия различных нагрузок для рассматриваемой стадии работы конструкции.

Учитывая то, что в среде ANSYS не реализован алгоритм анализа каждого элемента конструкции на основе расчетных сочетаний усилий (когда определяется наихудшее сочетание из всех приложенных нагрузок), по результатам, полученным в ходе решения аналогичной задачи в комплексе SCAD, был выбран самый неблагоприятный вариант для дальнейшего более глубокого и детального анализа в комплексе.

Наибольшие деформации были получены при моделировании работы конструкции в зимний период. При этом учитывались:

собственный вес конструкции;

постоянные нагрузки;

учет нагрузки от снежного покрова;

температурные нагрузки;

ветровые нагрузки.

Полученное в пакете SCAD напряженно-деформированное состояние конструкции полностью подтвердилось расчетами в ANSYS (рис. 4). Максимальный прогиб конструкции достигается в центре и составляет 12 см, а максимальные напряжения растяжения наблюдаются во внешнем кольце и составляют 196 МПа при пределе пластичности 245 МПа.

Учитывая то, что ветровое воздействие на купол имеет пульсационную составляющую, для подобных уникальных сооружений должны анализироваться собственные частоты и формы колебаний. По результатам расчета в среде ANSYS (рис. 5) видно, что собственные частоты наблю-

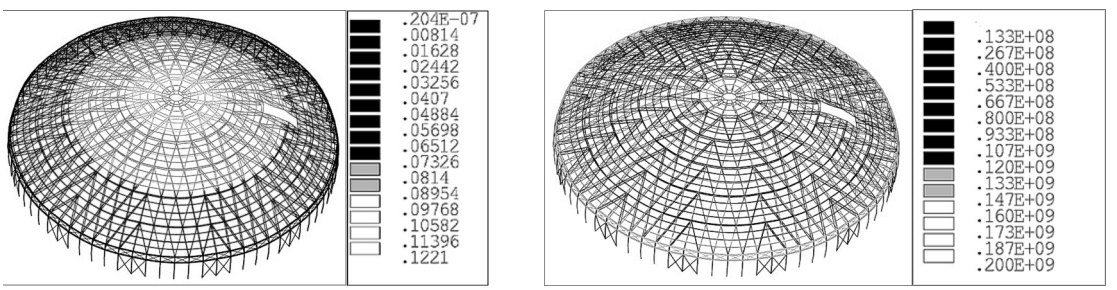


Рис. 4. Суммарные деформации (м) и эквивалентные напряжения элементов конструкции по Мизесу (Па) под действием собственного веса и снежного покрова (м)

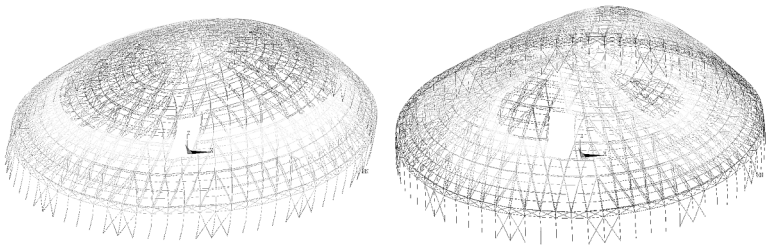


Рис. 5. Первая (2,357 Гц) и вторая (3,031 Гц) форма собственных колебаний

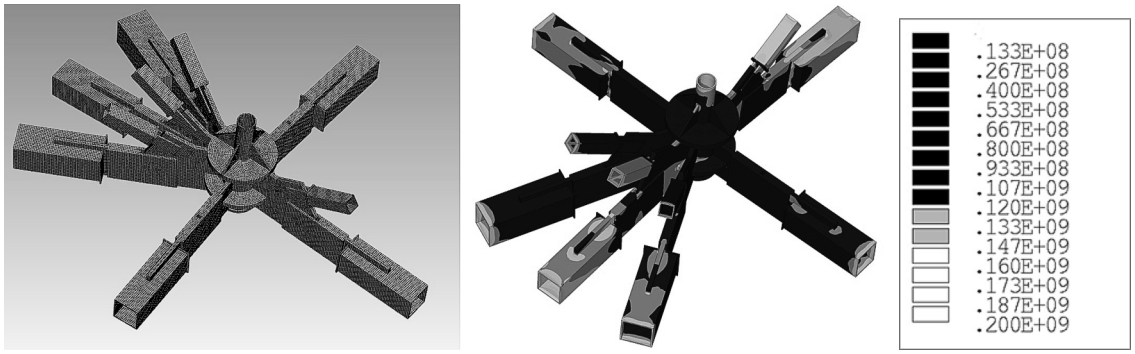


Рис. 6. Результат расчета узлов в пакете ANSYS (КЭ модель, напряжения по Мизесу, Па)

даются уже в районе 2–3 Гц. В соответствии со СНиП «Нагрузки и воздействия», исследуемая конструкция находится во II ветровом регионе, характеризующемся частотой ветровых пульсаций f =3,4 Гц. Следовательно, исследуемая конструкция подвергается особому риску возникновения резонанса.

Для расчета узловых соединений в комплексе твердотельного моделирования SolidWorks были разработаны трехмерные модели основных узлов конструкции. На основании расчета данных узлов в пакете ANSYS (рис. 6) были рассчитаны необходимые толщины пластин, сварные швы и болты.

Таким образом, на примере металлического сооружения купола нами продемонстрировано, что для проектирования уникальных и технически сложных сооружений требуется применение современных программных комплексов, позволяющих в необходимом объеме учитывать напряженно-деформированное состояние всех элементов конструкции, а также анализировать различные варианты исполнения и монтажа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Перельмутер, А.В.** Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст]/А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер.–Киев: Сталь, 2002.–600 с.

2. **Кудишин, Ю.И.** Металлические конструкции: Учебник для студ. высш. учеб. завед. [Текст]/Ю.И. Кудишин, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева [и др]; Под ред. Ю.И. Кудишина.–8-е изд., перераб. и доп.–М.: Изд. центр «Академия», 2006.–688 с.

3. **Болдырев, Ю.Я.** Современные технологии математического моделирования для инженерного анализа и проектирования в строительстве [Текст]/ Ю.Я. Болдырев, Д.А. Климшин, А.С. Шанина [и др.]// Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2010.–№ 4 (103).–С. 106–112.

УДК 532.517.4: УДК 62-784

К.И. Стрелец

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Для расчета осаждения частиц в циклоне с тангенциальным подводом воздуха предлагается использовать модель турбулентной диффузии с конечной скоростью.

Отличительная особенность модели:

учет влияния турбулентности на рассеивание примеси при осаждении;

возможность выделения крупности пылевидных частиц, осаждение которых можно обеспечить в циклоне с заданными характеристиками.

Для простейшей модификации модели диффузии с конечной скоростью примем, что концентрация частиц ϑ может быть представлена в виде суммы концентраций ϑ_1 и ϑ_2 твердых частиц, имеющих одну из двух «возможных» скоростей. При этом в расчет вводятся только радиальные пульсации скорости u_r' и предполагается, что они принимают попеременно два характерных значения u_r'' и $(-u_r'')$, равных стандарту пульсационной скорости $\sqrt{(u_r')^2}$ [2].

Система уравнений в цилиндрических координатах, соответствующая такой схематизации движения частиц пыли для установившегося движения имеет вид:

$$\begin{cases} u_\varepsilon^1 \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \vartheta_1}{\partial \varepsilon} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial (u_r^1 \vartheta_1 r)}{\partial r} = \omega^L(\vartheta_2 - \vartheta_1) \\ u_\varepsilon^2 \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \vartheta_2}{\partial \varepsilon} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial (u_r^2 \vartheta_2 r)}{\partial r} = \omega^L(\vartheta_2 - \vartheta_1) \end{cases}, \quad (1)$$

где u_ε^i – тангенциальная скорость движения частицы равная для обоих сортов скорости переносящего ее закрученного потока; u_r^i – радиальная скорость движения частицы i-го сорта, равная сумме центробежной гидравлической крупности w и скорости движения под действием пульсаций (u'' или $(-u'')$ в зависимости от сорта); ϑ_1, ϑ_2 – концентрация твердых частиц первого и второго сортов соответственно; ω^L – лагранжева частота изменения частицами пыли одной возможной скорости на другую. Она представляет собой отношение массы всех частиц, которые за единицу времени уходят из одного из сортов к массе всех частиц этого сорта. Для ее определения используется прием, предложенный Е.С. Ляпиным [4], согласно которому $\omega^L = \omega^E \dfrac{u_r''}{u_\varepsilon}$, где ω^E – эйлерова частота пульсационной скорости u_r', которая определяется с помощью функции спектральной плотности пульсаций [2].

Параметры, характеризующие осаждение, такие, как распределение тангенциальной скорости, значение пульсационной скорости, гидравлическая крупность частиц должны быть заданы. Они устанавливаются либо при исследовании физической модели циклона, либо на основе численного расчета потока в циклоне на основе трехмерной гидромеханической модели трехмерного потока [1]. Считая, что эти параметры известны, изложим численный метод решения этих уравнений.

Принимаем следующую схематизацию движения потока газа в циклоне. В циклон воздух расходом Q подается из воздуховодов прямоугольного поперечного сечения с размерами R- r_0 и b (рис. 1 и 2).

Поток воздуха будем считать осесимметричным, область течения находится между двумя соосными цилиндрами. В системе цилиндрических координат r изменяется от r_0 до R, а ε от 0 до значений, достигаемых при полном удалении примеси.

1. Средняя скорость воздуха в циклоне равна $v = \dfrac{Q}{(R - r_0)b}$, как правило, на практике составляет около 20 м/с.

2. Тангенциальная скорость является функцией от радиуса $u_\varepsilon = f(r)$ [3].

3. Пульсационная скорость u_r^i зависит от интенсивности турбулентности c. В первом приближении можно считать интенсивность турбулентности постоянной во всем объеме жидкости и принять $u_r' = u_\varepsilon c$, где c – интенсивность турбулентности $c = \dfrac{1}{10} \ldots \dfrac{1}{15}$.

4. Частота пульсаций постоянна в живом сечении и равняется $\omega^E = \dfrac{u_\varepsilon}{R - r_0}$, что подтвердили произведенные расчеты.

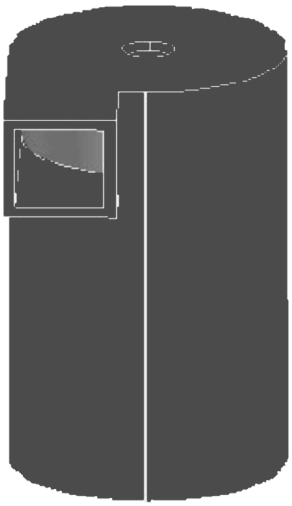


Рис. 1. Схема циклона

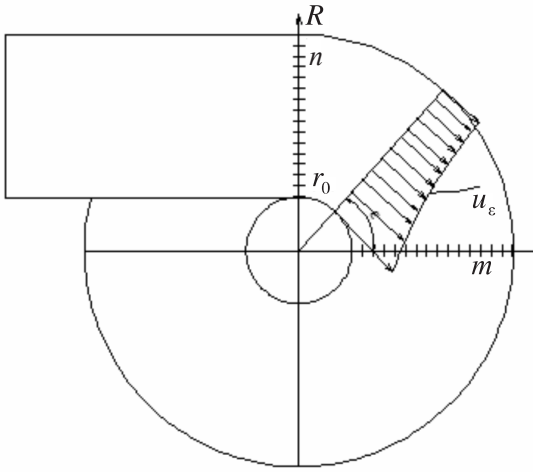


Рис. 2. Схематизация движения потока газа в циклоне

5. Радиальная скорость $u_r = u'_r + w_{цб}$, где $w_{цб}$ – центробежная гидравлическая крупность, которая вычисляется через гравитационную гидравлическую крупность w, считая, что обе эти скорости пропорциональны ускорениям действующим на частицу (центробежное ускорение и ускорение свободного падения соответственно):

$$w_{цб} = \frac{u_\varepsilon^2}{gr}\, w.$$

Так как нас интересует процесс осаждения, будем рассматривать такие частицы. Гидравлическая крупность всегда больше пульсационной скорости $w_{цб} \geq u''$, поэтому частицы всегда движутся к наружной стенке.

Сформулируем задачу Коши для системы уравнений (1). При заданных условиях на входе в циклон и заданном осесимметричном поле скорости в циклоне необходимо рассчитать плотность выпадения частиц на стенки циклона.

При этом, начальные условия для системы уравнений (1) следующие: частицы равномерно распределены в поперечном сечении, концентрация примеси на входе в циклон $\vartheta_{вх}$ принимается равной концентрации пыли, поступающей в циклон ϑ_0, а также принимаем $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \frac{\vartheta_{вх}}{2}$, т. е. частицы равномерно распределены между сортами.

Граничные условия: при $r = r0$ примесь в поток не поступает, т. е. поток примеси через твердую границу равен нулю, $\vartheta_1 = \vartheta_2 = 0$; скорость в пристеночной области не равна нулю, т. к. центробежная гидравлическая крупность всегда положительна (считаем $u_\varepsilon > 0$ вплоть до стенки).

На стенке циклона при $r = R$ вычисляется радиальный поток частиц «первого» и «второго» сорта, сумма которых определяет плотность распределения частиц, оседающих на стенку по периметру поверхности циклона.

Для численного решения системы воспользуемся методом конечных разностей. Для того чтобы ускорить расчеты, используем явную схему метода конечных разностей, что позволяет свести все вычисления к расчету по простым формулам, в частности, не требуется применение «метода прогонки», который используется в неявной схеме.

Представим расчетную область в виде ортогональной сетки, образованной концентрическими окружностями и радиусами. Запишем разностные уравнения для элемента этой сетки (рис. 3), представленного в виде прямоугольника.

Характеристические линии, как следует из (1), имеют угол наклона αi, тангенс которого равен: $\operatorname{tg} \alpha i = \frac{u_\varepsilon}{u_r^i}$. Для гиперболических скалярных дифференциальных уравнений первого порядка вдоль характеристических линий полная производная $d\vartheta_i = 0$, следовательно, значение функции ϑ в полосе между характерными линиями полностью определяется значениями этой функции на отрезке $a\ b$, при $\varepsilon = 0$.

Таким образом, значение функции в точке d можно определить, включив в разностную схему только значение функции из интервала $a\ b$. Введем конечно-разностную схему первого порядка точности, используя «правые» разности. Например, чтобы найти функцию в точке d, запишем

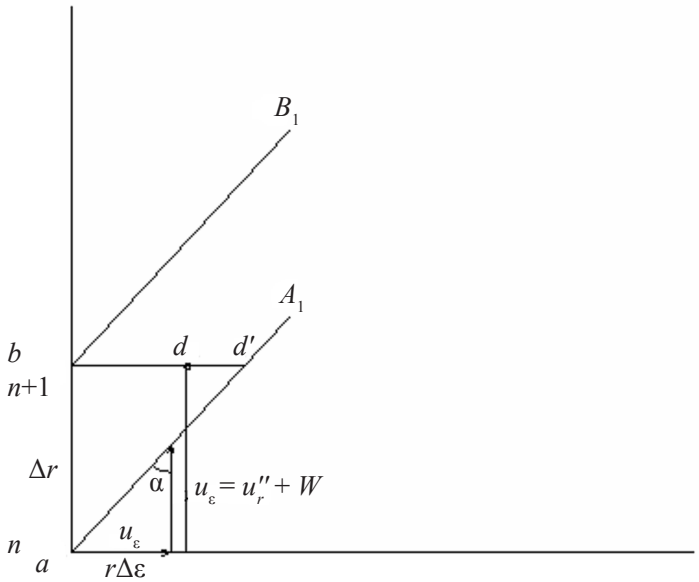


Рис. 3. Элемент сетки расчетной области

уравнение (1) в конечно-разностной форме:

$$u_{\varepsilon}^{i(m,n)}\frac{1}{r}\frac{(\vartheta_i^{(m+1,n)}-\vartheta_i^{(m,n)})}{\Delta\varepsilon}+$$

$$+\frac{1}{r}\frac{(u_r^{i(m,n+1)}\vartheta_i^{(m,n+1)}r^{(m,n+1)}-u_r^{i(m,n)}\vartheta_i^{(m,n)}r^{(m,n)})}{\Delta r}=$$

$$=\omega^L(\vartheta_j^{(m,n)}-\vartheta_i^{(m,n)}).$$

Очевидно, что точка d должна лежать внутри полосы, образованной характеристиками, это накладывает ограничения на шаг по ε, $bd < bd'$, иными словами, $\Delta\varepsilon r < \Delta r\mathrm{tg}\alpha$ или $\Delta\varepsilon < \Delta r\frac{1}{r}$. Это неравенство представляет собой известное условие Куранта–Фридрихса–Леви для уравнения (1).

Из уравнения (1) можно выразить концентрацию в точке d $\vartheta_1^{m+1,n}$ и $\vartheta_2^{m+1,n}$ для частиц первого и второго сортов соответственно:

$$\vartheta_1^{(m+1,n)}=\vartheta_1^{(m,n)}-$$

$$-\frac{\Delta\varepsilon}{u_{\varepsilon}^{1(m,n)}}\left(\frac{(u_r^{(1)(m,n+1)}\vartheta_1^{(m,n+1)}r^{(m,n+1)}-u_r^{(1)(m,n)}\vartheta_1^{(m,n)}r^{(m,n)})}{\Delta r}-\right.$$

$$\left.-r\omega^L(\vartheta_2^{(m,n)}-\vartheta_{1_1}^{(m,n)})\right).$$

Система уравнений (1) позволяет вычислить значение функции ϑ в любой точке. Кроме того, эта система позволяет вычислить поток примеси при $r = R$, т. е. на границе расчетной области. Этот поток – искомая величина, пользуясь которой можно определить количество примеси, удаляемой с помощью циклона. Масса частиц, выпавших на внешней поверхности до заданного значения ε определяется интегрированием кривой плотности распределения.

Система уравнений позволяет найти значение функции на внешней границе. Поток примеси через границу – искомая величина, вычисляемая при решении дифференциальных уравнений. Для соблюдения закона сохранения массы, на каждом шаге поток примеси, поступающей через радиальное сечение потока газа, при любом ε должен быть равен сумме потоков через радиальное сечение при ε + Δε и потоку через границу при $r = R$, таким образом, искомый поток Q_s осаждающихся на стенку циклона частиц на участке длиной $R\Delta$ ε:

$$Q_S=\sum_{i=2}^{N}u_{\varepsilon}^{i}\vartheta_1^{i,m}\Delta r=\sum_{i=2}^{N}u_{\varepsilon}^{i}\vartheta_1^{i,m+1}\Delta r.$$

Чтобы рассчитать степень очистки воздуха при заданном ε необходимо от начального потока Q_{S0} вычесть поток, выпавший на внешнюю стенку на участке от ε = 0 до ε:

$$Q_S^{cm}=\sum_{j=2}^{m}(u_r^{(1)(m)}\vartheta_1^{(m,j)}+u_r^{(2)(m)}\vartheta_2^{(m,j)})R\Delta\varepsilon.$$

В зависимости от заданной степени очистки можно вычислить значение, при котором она реализуется (рис. 4).

При использовании модели следует ввести следующие ограничения. Частицы не должны быть слишком крупными с тем, чтобы время релаксации этих частиц, т. е. время, в течение которого частицы приспосабливаются к скорости переносящего их жидкого объема [1], было меньше характерного времени постоянства пульсаци-

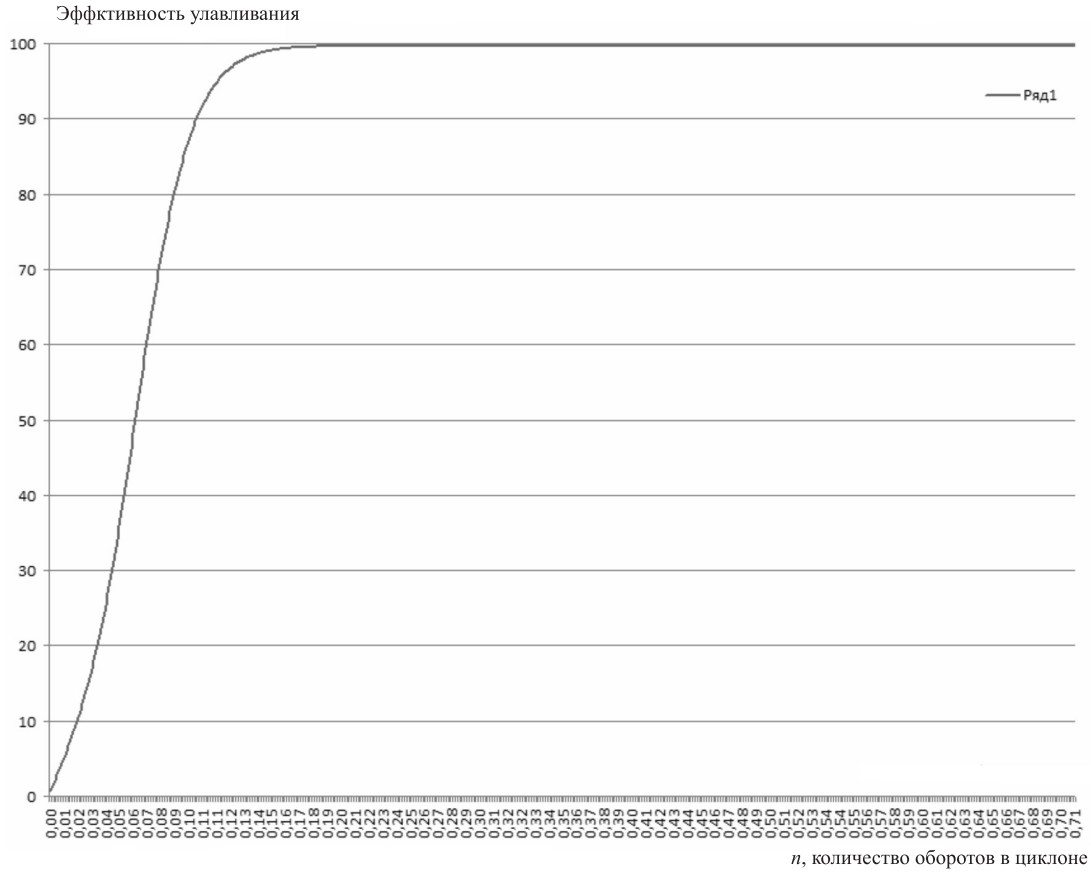


Рис. 4. Эффективность осаждения частиц в циклоне при следующих значениях: гидравлическая крупность w = 0,30 м/с, интенсивность турбулентности c = 0,1

онной скорости. Если это условие не соблюдается (т. е. частицы очень крупные), закономерность осаждения частиц не может быть рассчитана с помощью модели ДКС; они достигают стенки циклона на сравнительно коротком участке, зачастую не успевая приспособиться к скорости переносного тангенциального движение с осредненной скоростью, т. е. движутся в «снарядном режиме». Удаление таких частиц из циклона происходит на сравнительно коротком участке, и длина пути частицы до осаждения $\varepsilon_k R$ меньше чем длина εR, рассчитанная по методу ТДКС. Вместе с тем, частицы не могут быть слишком мелкими, т. е. их центробежная гидравлическая крупность не должна быть меньше пульсационной скорости u'_r, т. к. в этом случае не все частицы будут оседать на стенке.

Использование модели турбулентной диффузии с конечной скоростью в математическом моделировании процессов улавливания частиц в циклонах позволяет определить эффективность пылеулавливания в циклоне, с учетом влияния турбулентного движения потока газа. Принятый для решения дифференциальных уравнений метод конечных разностей позволяет обеспечить достоверные результаты моделирования для их применения в инженерной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гиргидов, А.Д.** Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст]/А.Д. Гиргидов.–СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.–С. 355–356.

2. **Гиргидов, А.Д.** Турбулентная диффузия с конечной скоростью [Текст]/А.Д. Гиргидов.–СПб.: СПбГТУ, 1996.–С.118–121.

3. **Гиргидов, А.Д.** О диссипации энергии в одномерных потоках в круглоцилиндрической трубе [Текст]/А.Д. Гиргидов//Тр. IV Рос. нац. конф. по теплообмену.–М.: Изд-во МЭИ, 2006.–С 18–19.

4. **Ляпин, Е.С.** Полугруппы [Текст]/Е.С.Ляпин.–М.: Физматгиз, 1960. –592 с.

УДК 681.3

Д.А. Макаров

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ДВИЖУЩИМСЯ ОБЪЕКТОМ В СИСТЕМАХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

В настоящее время во многих социальных и производственных областях человеческой деятельности получили распространение различные системы, ориентированные на видеонаблюдение как статических, так и динамических объектов. Они находят широкое применение в сферах обеспечения общественной безопасности, безопасности дорожного движения, мониторинга поверхности земли с воздуха, контроля качества изделий на этапах процесса их производства и т. д. Для этих областей актуально решение задачи слежения за движущимися объектами на движущемся фоне. Для этого необходима разработка методики, эффективных алгоритмов и программного комплекса отслеживания местонахождения искомых объектов в рамках кадров, транслируемых с видеокамеры.

Сформулируем требования к системе, решающей данную задачу.

1. Независимость эффективности процесса слежения от внешнего вида наблюдаемого объекта (формы, цвета и т. д.).

2. Возможность динамического указания объекта слежения.

3. Минимизация временных и вычислительных затрат системы.

Реализация первого требования необходима для обеспечения универсальности системы в отличие от методов слежения, основывающихся на распознавании образов и использующих для этого эталонные изображения. Количество используемых эталонов конечно, что в итоге приводит к возможности слежения лишь за ограниченным набором объектов. Теоретически, количество различных эталонов можно сделать бесконечно большим, но это приведет к увеличению дискового пространства, необходимого для их хранения, и времени на их обработку, что противоречит третьему требованию.

Понятие *динамическое указание объекта слежения*, сформулированное во втором требовании, можно определить как способность системы по команде оператора переключаться между различными объектами слежения в процессе своего функционирования. Под *командой оператора* в данном случае понимается щелчок кнопкой манипулятора типа «мышь» по нужному объекту на экране монитора. Реализация данного требования должна обеспечить автоматическую перенастройку параметров системы для работы с новым указанным объектом слежения без дополнительных действий со стороны оператора.

Последнее требование введено с учетом практического применения системы в мобильных комплексах видеонаблюдения, на автомобильных дорогах, в системах уличного наблюдения, а также в системах слежения с помощью беспилотных летательных аппаратов.

Методика слежения за движущимся объектом

С учетом сформулированных требований разработаны алгоритмы нахождения границ контура объекта произвольной формы на изображении и слежения за движущимся объектом. На базе предложенных алгоритмов разработана методика слежения, блок-схема которой приведена на рис. 1.

Как видно из рисунка, рабочий цикл системы начинается с получения очередного кадра от источника видеоинформации. Первое условие определяет, был ли указан объект слежения на одном из ранее полученных кадров. Если процедура указания объекта была выполнена к моменту получения текущего кадра (ветвь «Да» первого условия), то система переходит к выполнению своей основной рабочей функции – обнаружению местонахождения наблюдаемого объекта в рамках текущего кадра. При этом в работу включаются алгоритмы фильтрации изображения, алгоритм слежения и алгоритм нахождения границ контура.

Если же к моменту получения текущего кадра объект слежения указан не был (ветвь «Нет» первого условия) выполняется проверка второго условия, которое определяет указал ли оператор объект слежения на текущем кадре. При отрицательном результате проверки условия система пе-

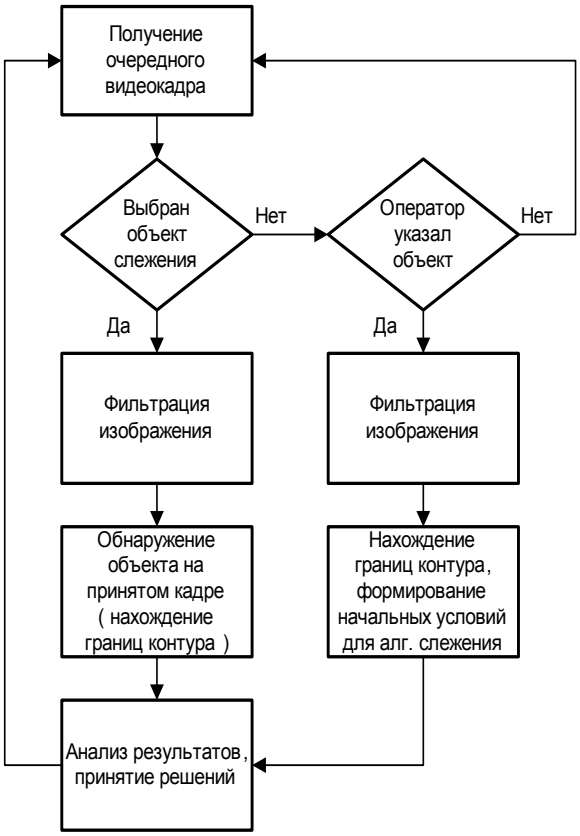


Рис. 1. Блок-схема методики слежения за движущимся объектом

реходит к следующей итерации рабочего цикла, иначе (ветвь «Да» второго условия) выполняется процедура фильтрации изображения, запускается алгоритм нахождения границ контура указанного объекта в рамках текущего кадра и результаты его работы используются для формирования начальных условий для алгоритма слежения.

Блок «Анализ результатов и принятие решений» в любом случае получает в качестве входных параметров координаты и размеры области, занимаемой объектом на текущем видеокадре, и рассчитанные координаты геометрического центра объекта. Конкретные функции этого блока зависят от предметной области, в которой применяется система, и решаемой прикладной задачи. Например, при слежении за движущимся объектом с помощью беспилотного летательного аппарата результаты анализа входных параметров могут быть использованы для формирования управляющих воздействий на бортовые исполнительные устройства, обеспечивающие управление скоростью и направлением полета летательного аппарата.

Рассмотрим используемые в методике алгоритмы.

Алгоритмы фильтрации изображения. Применение алгоритмов фильтрации изображения необходимо для подчеркивания вертикальных и горизонтальных границ на изображении. В алгоритмах фильтрации используются операторы выделения контуров [1], определяемые сверточной матрицей, согласно которой происходит анализ окрестности обрабатываемой точки изображения и вычисление ее результирующей интенсивности. Так, например, для подчеркивания вертикальных границ используются матрицы:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Использование двух матриц для выделения вертикальных границ обусловлено различным направлением градиента, т. е. граница объекта может характеризоваться как переходом от высокой интенсивности к низкой, так и переходом от низкой интенсивности к высокой.

На рис. 2 показан пример обработки изображения оператором подчеркивания вертикальных границ. Фрагмент *а* – исходное изображение,

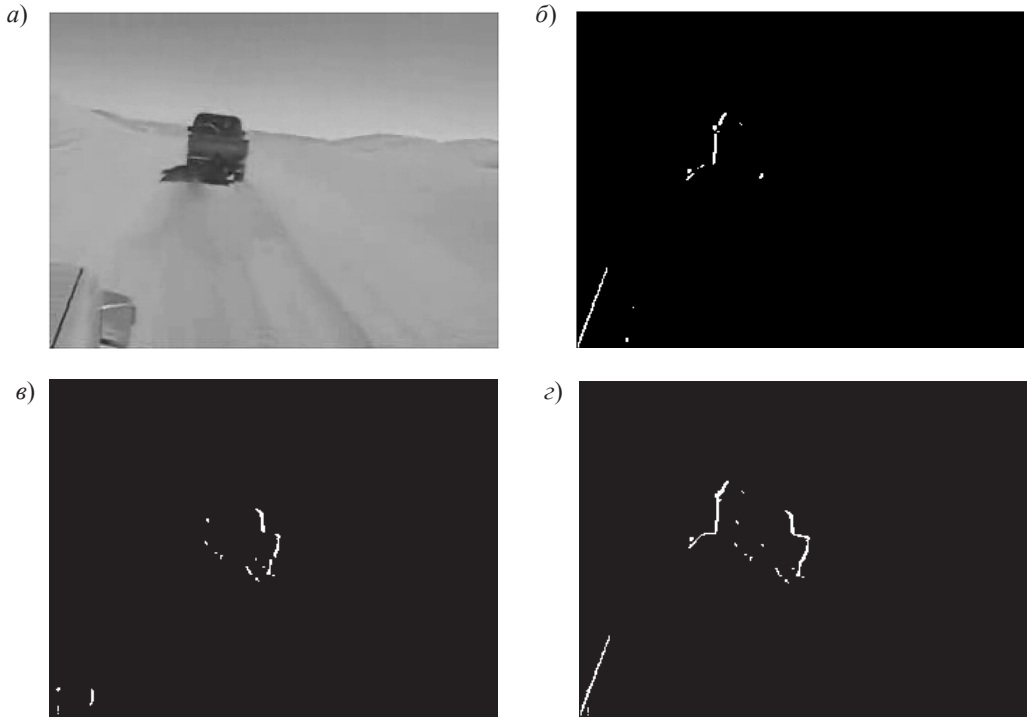


Рис. 2. Результат обработки изображения оператором подчеркивания вертикальных границ

б – результат обработки изображения с применением первой матрицы из числа описанных выше, *в* – результат обработки изображения с применением второй матрицы, *г* – сумма изображений *б* и *в*.

Следует отметить, что изображения, приведенные на рисунке, дополнительно обрабатывались пороговым фильтром для придания границам более четкого вида. Суть обработки пороговым фильтром заключается в том, что точки, значения интенсивности которых меньше заданного порога, заменяются на черные, а точки со значением интенсивности, превышающим заданный порог, заменяются на белые.

Обработанное таким образом изображение является в достаточной степени пригодным для выполнения процедуры нахождения координат граничных точек контура объекта.

Алгоритм нахождения границ контура объекта. Алгоритм нахождения границ контура объекта рассчитывает координаты его граничных точек и геометрического центра в рамках видеокадра [3]. В момент указания оператором объекта слежения на вход данного алгоритма поступают координаты указанной точки, принадлежащей изображению искомого объекта. В дальнейшем входные параметры алгоритма зависят от результатов работы алгоритма слежения за объектом. Алгоритм нахождения границ контура работает только с одним статичным кадром, отслеживание положения объекта в динамике обеспечивается алгоритмом слежения.

Пусть имеющийся кадр является черно-белым, т. е. каждая его точка описывается лишь одной характеристикой – интенсивностью белого цвета. Обозначим через $I(x, y)$ интенсивность белого цвета пикселя с координатами (x, y), причем функция $I(x, y)$ такая, что выполняется условие:

$$0 \le I(x, y) \le 1, \tag{1}$$

где значение $I(x, y) = 0$ соответствует черному цвету, $I(x, y) = 1$ – белому.

На любом этапе работы алгоритмов известны координаты одной из точек, принадлежащих изображению объекта в кадре – точки (x_0, y_0). Для определения верхней и нижней границ области, занимаемой объектом, введем множество V, состоящее из пикселей с координатами (x_0, y), где $y \in Y$ – множество значений, которые может принимать координата y. Количество элементов данного множества соответствует высоте кадра в пикселях. Таким образом, верхней границей области объекта является координата y того пикселя из множества V, для которого выполняются следующие условия:

$$\begin{cases} |I(x_0, y) - I(x_0, y_0)| > \Delta, \\ y > y_0, \\ (y - y_0) \to \min, \end{cases} \quad (2)$$

где последнее условие определяет тот факт, что за верхнюю границу области объекта принимается координата y ближайшего к исходной точке пикселя, интенсивность которого отличается от интенсивности исходного пикселя на величину, превышающую допустимый порог Δ. Обозначим координату y верхней границы области через $y_{\text{ВЕРХ}}$.

Для нижней границы области ($y_{\text{НИЖ}}$) условия (2) примут вид:

$$\begin{cases} |I(x_0, y) - I(x_0, y_0)| > \Delta, \\ y < y_0, \\ (y_0 - y) \to \min. \end{cases} \quad (3)$$

В процессе нахождения левой и правой границ области, занимаемой объектом, выполняются те же операции, только на множестве H, состоящем из пикселей с координатами (x, y_0), где $x \in X$ – множеству значений, которые может принимать координата x. Количество элементов данного множества соответствует ширине кадра в пикселях.

Аналогично получаются условия для левой и правой границ области:

для левой ($x_{\text{ЛЕВ}}$):

$$\begin{cases} |I(x, y_0) - I(x_0, y_0)| > \Delta, \\ x < x_0, \\ (x_0 - x) \to \min; \end{cases} \quad (4)$$

для правой ($x_{\text{ПРАВ}}$):

$$\begin{cases} |I(x, y_0) - I(x_0, y_0)| > \Delta, \\ x > x_0, \\ (x - x_0) \to \min. \end{cases} \quad (5)$$

При этом расчетный геометрический центр объекта будет находиться в точке C с координатами (x_C, y_C), где

$$x_C = \left(\frac{x_{\text{ПРАВ}} - x_{\text{ЛЕВ}}}{2} \right) + x_{\text{ЛЕВ}}; \quad y_C = \left(\frac{y_{\text{ВЕРХ}} - y_{\text{НИЖ}}}{2} \right) + y_{\text{НИЖ}}. \quad (6)$$

На рис. 3 приведены характерные точки и множества, используемые алгоритмом нахождения границ контура объекта.

Таким образом, контур объекта ограничен прямоугольником с координатами вершин ($x_{\text{ЛЕВ}}$, $y_{\text{ВЕРХ}}$), ($x_{\text{ПРАВ}}$, $y_{\text{ВЕРХ}}$), ($x_{\text{ПРАВ}}$, $y_{\text{НИЖ}}$), ($x_{\text{ЛЕВ}}$, $y_{\text{НИЖ}}$).

Алгоритм слежения. Данный алгоритм используется для отслеживания местонахождения объекта в динамике на основе данных, поступающих от алгоритма выделения границ контура.

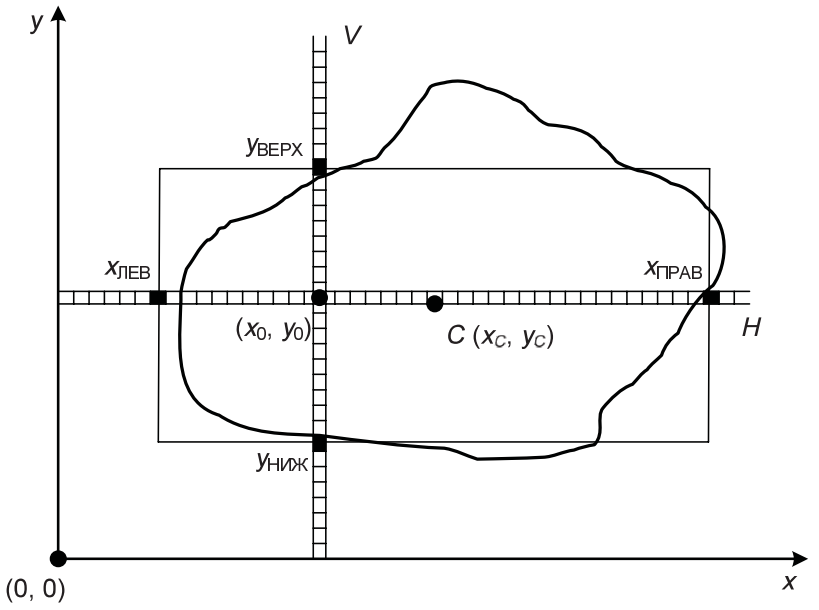


Рис. 3. Характерные точки и множества, используемые в алгоритме нахождения границ контура

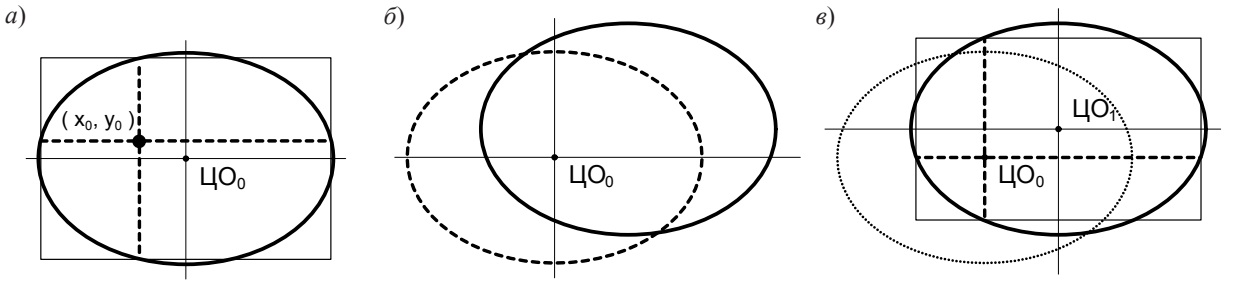


Рис. 4. Принцип работы алгоритма слежения

Принцип работы алгоритма слежения при смене кадров проиллюстрирован на рис. 4.

На рис. 4 *а* изображен момент указания оператором объекта слежения. На этой итерации рабочего цикла системы на основе информации о координатах точки (x_0, y_0), указанной оператором, производится нахождение границ контура объекта, расчет и запоминание координат его центра $ЦО_0$. Пусть на следующем кадре изображение объекта сместилось относительно его предыдущего положения так, как изображено на рис. 4 *б*. Нахождение границ контура объекта в этом (новом) положении будет производиться, исходя из запомненных координат точки $ЦО_0$, как показано на рис. 4 *в*.

Таким образом, отслеживание положения объекта в динамике реализовано путем запоминания его предыдущего положения на видеокадре.

Программный комплекс слежения за движущимся объектом

На базе предложенных алгоритмов реализован программный комплекс слежения за движущимся объектом, схема которого представлена на рис. 5.

Блок фильтрации предназначен для устранения шумов на изображении и его обработки при помощи операторов выделения контуров. В данном случае используется комбинация операторов, имеющих свёрточные матрицы выделения вертикальных и горизонтальных границ [1].

Кроме того, для повышения точности определения границ контура объекта в алгоритме используется процедура автоматического выбора значения порога Δ в зависимости от характеристик анализируемого изображения, в частности, от диапазона изменения интенсивностей точек. Так, для изображений с низкой контрастностью

Рис. 5. Схема программного комплекса слежения за движущимся объектом

и малым диапазоном изменения интенсивностей точек порог Δ устанавливается малым, что делает алгоритм более строгим к перепадам цвета. Для более четких изображений порог Δ увеличивается во избежание случайных срабатываний условий (2–5), вызванных незначительными изменениями цвета самого объекта.

Разработанный программный комплекс был использован для определения быстродействия предлагаемых алгоритмов. Исследования проводились на персональном компьютере с центральным процессором Intel Pentium 4, имеющим тактовую частоту 1,8 ГГц и объем оперативной памяти 256 Мбайт. Результаты исследований показали, что время на обработку одного изображения шириной 640 и высотой 480 точек составляет порядка 20 мкс, что позволяет сделать вывод о возможности применения алгоритмов в системах, имеющих в своем составе видеокамеры с частотой кадров до 50 Гц.

Требования к объему оперативной памяти напрямую зависят от размера обрабатываемого изображения и его формата. При тех же размерах изображения и кодировании цвета точки 4 байтами, требуемый объем оперативной памяти будет составлять порядка 1,3 Мбайт. При представлении каждой точки изображения градациями серого цвета (точка кодируется 1 байтом) требуемый объем снизится в 4 раза и будет составлять порядка 300 Кбайт.

Анализ устойчивости алгоритмов

Для оценки устойчивости предложенных в работе алгоритмов проведен ряд исследований и экспериментов с использованием программного комплекса. Критерием оценки являлось время, в течение которого безошибочно определялось местонахождение наблюдаемого объекта в кадре, начиная от момента указания оператором объекта слежения.

По качеству изображения все потоки видеокадров, используемые в исследованиях, делились на три группы:

с резкими границами контура наблюдаемого объекта;

со средней степенью размытости границ контура (объект имеет отличный от фона цвет, но его границы лишены резкости);

с визуальными помехами (объект иногда сливается с фоном, перекрывается другими объектами).

Результаты проведенного анализа показали, что для первых двух групп алгоритмы устойчиво решали задачу слежения за объектом на протяжении всего времени воспроизведения потока видеокадров. На третьей группе алгоритмы слежения оказались менее устойчивыми.

Таким образом, предложенные алгоритмы успешно справляются с решением задачи слежения за движущимся объектом независимо от резкости границ контура объекта. Наличие визуальных помех иногда приводит к сбою в работе алгоритмов в течение нескольких итераций рабочего цикла системы.

Отметим также влияние динамики перемещения объекта между соседними кадрами на безошибочность работы предлагаемых алгоритмов. При высокой скорости перемещения объекта между кадрами может возникнуть ситуация, при которой ранее рассчитанный центр объекта окажется вне зоны объекта на следующем кадре, алгоритм нахождения границ контура получит на вход неверные данные и система «потеряет» объект слежения.

Что касается формы объекта слежения, то алгоритмы устойчиво работают с объектами, форма которых представляет собой выпуклый многоугольник. При слежении за объектами более сложной формы может произойти ситуация «потери» объекта слежения, описанная выше.

Одним из вариантов практического применения описанной методики и алгоритмов является их использование в составе модуля системы автоматического управления беспилотного летательного аппарата, решающего задачу слежения за движущимся наземным объектом. Функции модуля слежения заключаются в оперативном анализе входной информации с бортовой видеокамеры, определении местонахождения искомого объекта и выдаче в систему автоматического управления сигналов на корректировку направления и скорости полета летательного аппарата, чтобы сохранить наблюдаемый объект в поле зрения объектива видеокамеры. Введение подобных средств автоматизации позволит оператору наземного пункта управления снять с себя часть функций по управлению летательным аппаратом и повысить эффективность процесса слежения за движущимся наземным объектом.

В настоящее время производится опытная эксплуатация разработанного программного ком-

плекса в Управлении связи, специальной техники и автоматизации МВД по РТ в составе системы поддержки принятия решений при видеомониторинге подвижных объектов [2]. Текущие результаты эксплуатации показали его пригодность для практического использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Глова, В.И.** Исследование операторов выделения контуров на размытых и неразмытых изображениях. [Текст]/В.И. Глова, И.В. Аникин, Д.В. Козырев.–Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1998.

2. **Глова, В.И.** Системы поддержки принятия решений при видеомониторинге подвижных объектов [Текст]/В.И. Глова, Р.Х. Шакиров, А.С. Катасёв//Информационные технологии в науке, образовании и производстве: Матер. Всерос. науч. конф.–Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2007.–С. 519–522.

3. **Макаров, Д.А.** Выделение размытых контуров на изображении [Текст]/Д.А. Макаров, А.С. Катасёв//Наука и профессиональная деятельность: Матер. Всерос. науч.-практ. конф; Под ред. В.А. Песошина.–Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. –С. 164–166.

УДК 519:324.17

В.А. Кубаев

НЕСТРОГОЕ ВЛОЖЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ В ПРИЛОЖЕНИИ К ПОИСКУ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ

В данной статье рассматривается задача по нестрогому поиску по шаблону в упорядоченных размеченных деревьях. Эта задача имеет прикладное значение и широкую область применения при организации семантического поиска математической информации, представленной в XML-форматах (MathML, OpenMath, Office Open XML).

Задача поиска в целевом дереве T по шаблону P состоит в необходимости определения, может ли шаблонное дерево быть вложено в некотором смысле в целевое дерево. Для организации гибкости поиска это вложение целесообразно делать нестрогим, а для определения релевантности результата поиска вводить стоимостную функцию вложения.

В литературе встречаются различные подходы для определения стоимостной функции в случае нестрогого поиска поддерева. Ряд авторов [3, 7 и др.] определяют стоимостную функцию на основании операций редактирования (удаления, вставки и переименования вершин). В [8] предложен алгоритм, определяющий стоимостную функцию на основе числа несовпадающих путей в целевом и шаблонном дереве. Нестрогое соответствие поддеревьев возникает также в задаче определения изменений в структурированных и частично структурированных данных [4, 9].

Применение указанных выше подходов к нестрогому поиску поддеревьев оказывается неэффективным в случае поиска математических выражений. С одной стороны, сильно различающиеся по смыслу документы могут оказаться очень близки в значении используемых в этих подходах стоимостных функций. С другой стороны, эти подходы часто не дают возможности определить два сходных по смыслу документа как имеющих маленькое расстояние между собой.

В статье предлагается новый подход к нестрогому поиску поддеревьев, который использует набор разрешенных преобразований поддеревьев шаблонного дерева. Каждому разрешенному преобразованию присваивается вес и ставится задача по поиску минимально возможного суммарного веса преобразований, позволяющих вложить шаблонное дерево в целевое.

Основные определения. Дадим основные определения, используемые в статье. Эти определения являются общепринятыми и с некоторыми вариациями могут быть найдены в классических работах [1, 2 и др.].

Деревом T называется набор $T = (V, E, \mathrm{root}(T))$, в котором V – конечное множество *вершин*, E – двоичное отношение на множестве вершин, назы-

ваемое *множеством ребер*, и root(T) – выделенная вершина, называемая *корнем дерева*. Говорят, что пара (u, v) является *ребром* дерева, если (u, v)$\in E$. При этом вершину u называют *родительской* вершиной для вершины v, а вершину v – *дочерней* вершиной для вершины u.

Множество ребер E должно удовлетворять следующим условиям.

1. Корень дерева не имеет родительской вершины: $\nexists v \in V : (v, \text{root}(T)) \in E$.

2. Любая вершина, за исключением корня, имеет ровно одну родительскую вершину: $\forall v \in V, v \neq \text{root}(T)\ \exists! u \in V : (u, v) \in E$.

3. Из корня к любой вершине идет путь: (root(T), v)$\in E^*$ $\forall v \in V$, где E^* – рефлексивное транзитивное замыкание E.

Дерево называют *упорядоченным*, если для любой вершины $v\in V$, множество ее дочерних вершин children(v) упорядочено.

Дерево T называется *помеченным*, если существует функция $l : V \to A$, задающая соответствие между множеством вершин V и некоторым алфавитом A. Будем обозначать метку вершины v как label(v). В дальнейшем будем считать, что все рассматриваемые деревья помечены с помощью одного и того же алфавита.

Если для пары вершин u, $v\in V$ существует путь из u в v (то есть (u, v)$\in E^+$, где E^+ – транзитивное замыкание E), то v называют *потомком* вершины u. Множество потомков вершины v обозначим desc(v).

Количество дочерних вершин для вершины v будем обозначать через $|v|$. Количество вершин в дереве T будем обозначать через $|T|$.

Дерево, образованное некоторой вершиной $v\in V$ и всеми ее потомками, называют *поддеревом* дерева T и обозначают $T[v]$. $T[v] = (V', E', v)$, где $V' = \{v\} \bigcup \text{desc}(v), E' = E \bigcap (V' \times V')$.

Пусть в дереве T = (V, E, root(T)) вершины $v_1, v_2, ..., v_k$, $k \geq 0$ являются дочерними вершинами корня root(T). Тогда обход дерева *в обратном порядке* задается рекурсивным алгоритмом:

1. посетить в обратном порядке $T[v_1]$, $T[v_2]$, ..., $T[v_k]$ в указанной последовательности;

2. посетить root(T).

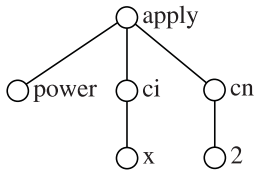
Будем обозначать порядковый номер вершины v при обратном порядке обхода через post(v).

Везде далее, под деревом, если специально не оговорено иное, мы будем понимать упорядоченное помеченное дерево.

Постановка задачи

Рассмотрим представление математической формулы в виде дерева, вершины которого представляют собой элементы формулы, а ребра определяют отношения между этими элементами. В качестве практической иллюстрации такого представления можно привести пример форматов MathML, OpenMath и формат Office Open XML. Например, в формате разметки содержания MathML 2.0 выражение «переменная x в квадрате» будет записана в следующем виде:

```
<apply>
  <power/>
  <ci>x</ci>
  <cn>2</cn>
</apply>
```



Предположим, что у нас есть некоторая библиотека математических выражений в древовидном представлении и нам необходимо решить задачу информационного поиска, в которой запросом пользователя является некоторое математическое выражение (шаблон), а ответом на запрос – множество элементов библиотеки, включающих запрос пользователя как подвыражение. При этом мы бы хотели осуществлять поиск с точностью до некоторого набора математических преобразований и соответствующим образом мерить релевантность результатов поиска.

Дадим формальную постановку этой задачи.

Введем понятие *множества G допустимых преобразований деревьев* как множество троек $\left\{(G_1^o, G_1^t, c_1), (G_2^o, G_2^t, c_2), ..., (G_{N_G}^o, G_{N_G}^t, c_{N_G})\right\}$, где G_i^o – дерево, к которому может быть применено i-е допустимое преобразование, G_i^t – дерево, представляющее собой результат i-го допустимого преобразования, и c_i, $c_i \geq 0$ – стоимость i-го допустимого преобразования.

Будем говорить, что дерево P = (W, F, root(P)) *может быть вложено* в дерево T = (V, E, root(T)) (обозначаем $P \preceq T$), если существует инъективная функция $f : W \to V$, такая, что выполнены условия:

1. $\forall u, w \in W\ f(u) = f(w) \Leftrightarrow u = w$;
2. $\forall w \in W\ \text{label}(w) = \text{label}(f(w))$;
3. $\forall u, w \in W\ (u, w) \in F \Leftrightarrow (f(u), f(w)) \in E$;
4. $\forall u, w \in W\ \text{post}(u) < \text{post}(w) \Leftrightarrow \text{post}(f(u)) < \text{post}(f(w))$.

Если дерево P может быть вложено в дерево T так, что f(root(P)) = root(T), то будем говорить,

что дерево P может быть вложено в дерево T с сохранением корня (обозначаем $P \preceq^{*} T$).

Будем говорить, что дерево $P = (W, F, \text{root}(P))$ *может быть вложено* в дерево $T = (V, E, \text{root}(T))$ *с помощью множества допустимых преобразований* G (обозначаем $P \preceq_G T$), если существует:

подмножество вершин $W' \subset W, W' = (w'_1, ..., w'_k)$,

мультимножество допустимых преобразований $G' = \left\{ \left(G^o_{j_1}, G^t_{j_1}, c_{j1}\right), ..., \left(G^o_{j_k}, G^t_{j_k}, c_{j_k}\right) \right\}$, $\forall i = 1...k \left(G^o_{j_i}, G^t_{j_i}, c_{j_i}\right) \in G$,

инъективная функция $f : W'' \to V$, где $W'' = W \setminus \left(\bigcup_{w \in W'} \text{desc}(w) \right)$,

такие, что выполнены условия:

1. $\exists u, w \in W' : u \in \text{desc}(w)$;
2. $\forall u, w \in W'' \; f(u) = f(w) \Leftrightarrow u = w$;
3. $\forall w \in W'' \setminus W' \; \text{label}(w) = \text{label}(f(w))$;
4. $\forall w_i \in W' \; P[w_i] = G^o_{j_i}$ и $G^t_{j_i} \preceq^{*} T[f(w_i)]$;
5. $\forall u, w \in W'' \; (u, w) \in F \Leftrightarrow (f(u), f(w)) \in E$;
6. $\forall u, w \in W'' \; \text{post}(u) < \text{post}(w) \Leftrightarrow \text{post}(f(u)) < \text{post}(f(w))$.

Весом вложения с помощью допустимых преобразований G' назовем сумму весов используемых при вложении преобразований $\sum_{j=1}^{k} c_j$.

Пусть $L = \left\{ L_1, L_2, ..., L_{N_L} \right\}$ – фиксированное множество деревьев, в которых необходимо осуществить поиск, и дерево P – запрос пользователя. Задача нестрогого относительно набора преобразований поиска поддерева по шаблону состоит в том, чтобы для данного шаблона P найти минимальный вес вложения с помощью множества допустимых преобразований в каждое дерево библиотеки L.

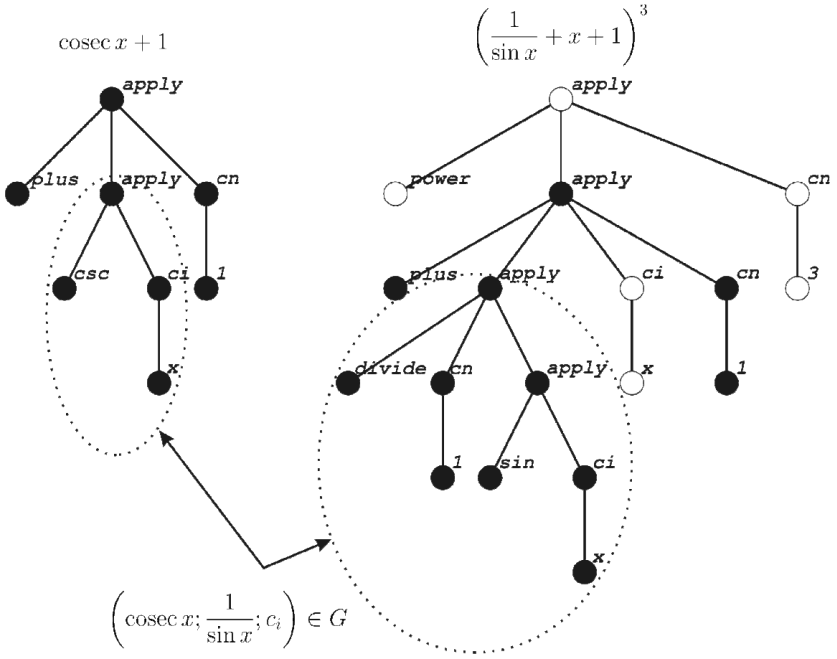
На рисунке приведен пример вложения с помощью набора допустимых преобразований для формул в формате разметки содержания MathML 2.0.

Алгоритм поиска

Алгоритм поиска состоит из двух этапов: этапа предобработки шаблона P и элементов библиотеки L и этапа поиска вложения с минимальным весом.

На этапе предобработки шаблона P осуществляется поиск допустимых преобразований, которые могут быть применены к дереву P, и к метке каждой вершины шаблона добавляется множество идентификаторов преобразований, которые могут быть применены в данных вершинах (обозначим это множество trans(v)). В терминах вложения деревьев это означает, что для каждой пары G^o_i и P нам необходимо найти все вершины v дерева P, такие что $P[v]$ идентично G^o_i. Эта задача является классической и может быть решена за время $O(|P|)$ [5, 6].

При предобработке элемента библиотеки L_j осуществляется поиск допустимых преобразований, результаты которых могут быть вложены в элемент библиотеки, и к метке каждой вершины



Пример вложения

v добавляется множество идентификаторов преобразований, результаты которых могут быть вложены в $L_j[v]$ с сохранением корня (также обозначим это множество trans(v)).

Для реализации алгоритма предобработки используется техника динамического программирования: для каждой пары G_i^t и L_j организуется обратный обход вершин деревьев. Такой порядок обеспечивает нам то, что при проверке вложения поддерева $G_i^t[v]$ в поддерево $L_j[v]$ мы будем обладать информацией о возможности вложить поддеревья в дочерних вершинах u в поддеревья в дочерних вершинах v. На основании этого в процессе обхода для каждого дерева G_i^t заполняется двумерный массив $A[1...|G_i^t|, 1... |L_j|]$, в элементе $A[k, l]$ которого сохраняется информация о возможности вложить поддерево в вершине с номером k в G_i^t в поддерево в вершине с номером l в L_j.

Для удобства обозначения мы будем отождествлять в алгоритме вершину и ее номер в порядке обратного обхода.

Алгоритм 1 *Предобработка элемента библиотеки L_j.*

Вход: Множество помеченных упорядоченных деревьев $G^t = \{G_i^t\}$, $i = 1, ..., N_G$ и помеченное упорядоченное дерево L_j.

Выход: Упорядоченное дерево L_j, к метке каждой вершины v которого добавлено множество идентификаторов преобразований, результаты которых могут быть вложены в $L_j[v]$ с сохранением корня.

Алгоритм:

01 **for** $i := 1,\ldots,N_G$ **do** // Организуем цикл по G^t;

02 Инициализируем $A[1\ldots|P|,1\ldots|L_j|]$ величиной $+\infty$;

03 **for** $v := 1,\ldots,|L_j|$ **do** // Организуем обратный обход вершин L_j;

04 **for** $u := 1,\ldots,|G_i^t|$ **do** // Организуем обратный обход вершин G_i^t;

05 **if** $\text{label}(u) = \text{label}(v)$ **then**

06 Обозначим $\{u_1,\ldots,u_{|u|}\} := \text{desc}(u)$;

07 **if** Существуют $\{v_1,\ldots,v_{|u|}\} \in \text{desc}(v)$ такие, что $A[u_i, v_i] < +\infty \; \forall i = 1,\ldots,|u|$ **and** $\text{post}(v_i) < \text{post}(v_j) \; \forall i < j$ **then**

08 $A[u, v] := 0$;

09 **endif;**

10 **endif;**

11 **endfor;**

12 **if** $A[\text{root}(G_i^t), v] < +\infty$ **then** //Нашли вхождение G_i^t в поддерево $L[v]$;

13 $\text{trans}(v) := \text{trans}(v) \bigcup \{i\}$;

14 **endif;**

15 **endfor;**

16 **endfor**.

Условие, сформулированное в строке 07 алгоритма 1, может быть проверено за линейное время O(|v|). Для этого достаточно установить указатель на вершину u_1 и последовательно перебирать вершины children(v) слева направо, передвигая указатель при каждом совпадении меток вершин на u_{i+1}. Если в конце просмотра указатель будет указывать на вершину $u_{|u|}$, то условие выполнено. В противном случае, не выполнено.

Лемма 1 *Сложность алгоритма 1 по времени составляет* $O\left(|L_j| \sum_i |G_i^t|\right)$.

Доказательство. Внутри цикла 01 – 16, с учетом замечания после алгоритма 1, сложность составит:

$$O\left(\sum_{v \in L_j}\left(1 + \sum_{u \in G_i^t}(1 + |v|)\right)\right) = O\left(|L_j| + |L_j||G_i^t| + |G_i^t|\left(|L_j| - 1\right)\right) = O\left(|L_j||G_i^t|\right).$$

Суммируя по i, получаем требуемую величину.

Перед тем как перейти к этапу поиска вложения с минимальным весом, рассмотрим вспомогательную задачу. Пусть имеется таблица $C(k \times n)$, $n \geq k$, содержащая неотрицательные числа c_j^i и значения $+\infty$. Требуется найти минимальную сумму чисел $\sum c_j^i$ для всех множеств $c_{j_1}^1, ..., c_{j_k}^k$, таких что для любого $i = 2, ..., k, j_i > j_{i-1}$ (т. е. для множеств, содержащих в каждой строке ровно по одному числу, при этом в каждой следующей строке число должно находиться правее числа в предыдущей строке). Назовем такие множества чисел «лесенками», а задачу – «задачей о минимальной сумме лесенки».

Лемма 2 *Задача о минимальной сумме лесенки может быть решена за время $O(kn)$.*

Доказательство. Для доказательства утверждения рассмотрим алгоритм, решающий задачу за время $O(kn)$. В основе алгоритма лежит идея о том, что если у нас есть лесенка с минимально возможной суммой чисел, то, во-первых, число в последней строке $c^k_{j_k}$ не больше всех своих правых соседей в ряду, а, во-вторых, мы можем заменить это число на его самого правого соседа, имеющего такую же величину. Продолжая эту идею на остальные строки, мы можем строить снизу вверх, справа налево лесенки, включающие лесенки с минимальной суммой.

Алгоритм 2 *Поиск минимальной суммы лесенки.*

Вход: Таблица $C(k \times n)$, $n \geq k$, содержащая неотрицательные числа c^i_j и значения $+\infty$.

Выход: Множество с минимальной суммой чисел $\sum c^i_j$ среди всех множеств $c^1_{j_1}$,..., $c^k_{j_k}$, таких что для любого $i = 2, ..., k, j_i > j_{i-1}$.

Алгоритм:

01 **for** $i := k,\ldots,2$ **do** // Организуем цикл по строкам таблицы;

02 $c_min := C[i, n-(k-i)]$; //Инициализируем минимальное число;

03 **for** $j := n-(k-i),\ldots,i$ **do** // Организуем цикл по необходимым столбцам;]

04 **if** $c_min > C[i, j]$ **then**

05 $c_min := C[i, j]$;

06 **endif;**

07 $C[i-1, j-1] := C[i-1, j-1] + c_min$;

08 **endfor;**

09 **endfor;**

10 **return** $\min(C[1,1],\ldots,C[1,k])$.

Заметим, что алгоритм можно легко модифицировать так, чтобы он возвращал не только минимальную сумму лесенки, но и лесенку, на которой эта сумма достигается. Для этого необходимо в строке 07 алгоритма 2 сохранять в ячейке не только вес, но и номера ячеек лесенки.

Сложность по времени предложенного алгоритма составляет $O(kn)$.

Перейдем теперь к алгоритму поиска минимального вложения. В этом алгоритме используется техника, аналогичная технике в алгоритме 1.

Алгоритм 3 *Поиск минимального вложения дерева.*

Вход: Множество допустимых преобразований G, предобработанный шаблон P, предобработанный элемент библиотека L_j.

Выход: Минимальный вес вложения с помощью множества допустимых преобразований шаблона P в элемент библиотеки L_j.

Алгоритм:

01 Инициализируем $A[1\ldots|P|,1\ldots|L_j|]$ величиной $+\infty$;

02 **for** $v := 1,\ldots,|L_j|$ **do** // Организуем обратный обход вершин L_j;

03 **for** $u := 1,\ldots,|P|$ **do** // Организуем обратный обход вершин P;

04 $c_min := +\infty$;

05 **if** $\text{label}(u) = \text{label}(v)$ **then**

06 Обозначим $\{u_1,\ldots,u_{|u|}\} := \text{desc}(u)$;

07 Обозначим $\{v_1,\ldots,v_{|v|}\} := \text{desc}(v)$;

08 $c_min :=$ минимальная сумма лесенки для подматрицы A, образованной пересечением строк $u_1,\ldots,u_{|u|}$ и столбцов $v_1,\ldots,v_{|v|}$;

09 **endif;**

10 **if** $\text{trans}(u) \bigcap \text{trans}(v) \neq \varnothing$ **then**

11 $c := \min_{i \in \text{trans}(u) \bigcap \text{trans}(v)} c_i$;

12 $c_min := \min(c, c_min)$;

13 **endif;**

14 $A[u, v] := c_min$;

15 **endfor;**

16 **endfor;**

17 **return** $\min(A[\text{root}(P),1],\ldots,A[\text{root}(P),|L_j|])$.

В строках 05–09 алгоритма 3 мы ищем минимальную стоимость сопоставления дочерних вершин u с подмножеством дочерних вершин вершины v с сохранением порядка. Эта задача эквивалентна решению задачи о минимальной

сумме лесенки для подматрицы A, образованной пересечением строк u_1, ..., $u_{|u|}$ и столбцов v_1, ..., $v_{|v|}$ (каждая лесенка может быть естественным образом отождествлена с сопоставлением дочерних вершин, и наоборот). В строках 10–13 проверяется возможность изменить поддерево $P[u]$ с помощью набора допустимых преобразований, так чтобы оно могло быть вложено с сохранением корня в поддерево $T[v]$. После этого минимальный вес вложения сохраняется в ячейке $A[u, v]$.

Теорема 1 *Алгоритм 3 имеет сложность* $O\left(|L_j||P| + N_G\,|P|\right)$.

Доказательство. Внутри цикла 02–16, с учетом леммы 2, сложность составит:

$$O\left(\sum_{v\in L_j}\left(1+\sum_{u\in P}\left(1+|v||u|+N_G\right)\right)\right)=O\left(|L_j|+|L_j||P|+\right.$$

$$\left.+(|P|-1)(|L_j|-1)+|P|N_G\right)=O\left(|L_j||P|+|P|N_G\right).$$

Слагаемое $|v||u|$ соответствует решению задачи о минимальной сумме лесенки, а N_G – поиску пересечения множеств преобразований и выбору минимального по весу преобразования.

Суммируя сложность всех используемых алгоритмов, мы получаем, что для предобработки библиотеки нам требуется время $O\left(\sum_j |L_j| \sum_i |G_i'|\right)$ и для каждого запроса пользователя требуется время $O\left(|P|\ N_G\right)$ на предобработку запроса и $O\left(|P|\sum_j |L_j| + |P|N_G\ N_L\right)$ на поиск минимального вложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ахо, А.** Построение и анализ вычислительных алгоритмов [Текст]/А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман–М.:–Мир, 1979.

2. **Кнут, Д.Е.** Искусство программирования [Текст]/Д.Е. Кнут//Основные алгоритмы; 3-е изд. –Вильямс.–2000. –Т. 1.

3. **Bille, P.** Tree Edit Distance, Alignment Distance and Inclusion [Текст]/ P. Bille//IT University Technical Report Series.–2003.

4. **Chawathe, S.S.** Representing and Querying Changes in Semistructured Data [Текст]/S.S. Chawathe, S. Abiteboul, J. Widom//Proc. of the 14th International Conf. on Data Engineering (ICDE'98).–1998. –P. 4–13.

5. **Dublish, P.** Some comments on the subtree isomorphism problem for ordered trees [Текст]/P. Dublish// Information Proc. Letters.–1990.–Vol. 36.–P. 273–275.

6. **Grossi, R.** A note on the subtree isomorphism for ordered trees and related problems [Текст]/R. Grossi// Information Proc. Letters.–1991.–Vol. 39.–P. 81–84.

7. **Kovacs, L.** Approximate Subtree Search for Labeled Trees with Small Depth Value [Текст]/L. Kovacs, T. Repasi, E. Baksa–Varga//Proc. of SAMI 2005.–P. 303–311.

8. **Shasha, D.** ATreeGrep: Approximate Searching in Unordered Trees [Текст]/D. Shasha, J. T.–L. Wang, H. Shan [et al.]//SSDBM '02: Proc. of the 14th International Conf. on Scientific and Statistical Database Management.–2002.–P. 89–98.

9. **Su, H.** Automating the Transformation of XML Documents [Текст]/H. Su, H. Kuno, E.A. Rundensteiner// Proc. of the 3rd International Workshop on Web Information and Data Management (WIDM'01).–2001. –P. 68–75.

УДК 519.86

Б.И. Мызникова, Т.П. Васильева

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАДОФОРМИРОВАНИЯ: ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД

Город – это сложная открытая система, в которой взаимодействие подсистем при благоприятных условиях стимулирует процветание занимаемой территории. Но с течением времени сложившаяся инфраструктура, эффективность функционирования экономики, качество окружающей среды, уровень жизни населения претерпевают изменения, что, при отсутствии контроля за нарастающими проблемами организации урбанизированной территории, может привести к ее стагнации и упадку, либо к возникновению хаотических режимов эволюции городской системы.

Явлениям, сопровождающим развитие современных территориальных образований, посвящен

ряд теоретических исследований [2, 5, 6]. Монография [2] раскрывает принципиально новые возможности, связанные с математическим моделированием процессов в экономических системах на базе синергетического подхода. В [6] обоснована целесообразность применения методологии самоорганизации для анализа проблем урбанизации, особенно остро проявившихся в конце прошлого века. Авторами [5] предложен метод активного регулирования параметров городской динамической системы после потери устойчивости равновесного режима, что способствует стабилизации ее траектории.

В настоящей статье представлены результаты изучения проблемы градоформирования на основе синергетического подхода. Использована детерминированная нелинейная динамическая модель и методы качественной теории динамических систем. По данным вычислительных экспериментов построены бифуркационные диаграммы состояний системы, ее фазовые портреты в проекциях на плоскости переменных модели и указаны области значений параметров, где система демонстрирует различные динамические режимы. Дана интерпретация результатов моделирования на основе реальных данных социально-экономического развития Пермского края за 2005 г., зафиксированных Госкомстатом Российской Федерации [7].

Постановка задачи и описание математической модели

Рассмотрим городскую систему. Ее локационные характеристики выразим следующими тремя переменными: $X(t)$ – объем выпуска продукции, производимой на территории города; $Y(t)$ – численность населения; $Z(t)$ – средние цены на первичном рынке жилья.

Первые два показателя являются ключевыми при сравнительном анализе привлекательности территориального образования. Динамика третьего показателя, на наш взгляд, также позволяет оценить перспективы развития территории, поскольку сравнительно резкое падение среднего уровня цен на первичном рынке жилья может свидетельствовать о снижении благосостояния населения и депрессивном характере экономики города, а взлет цен может служить индикатором предстоящего оттока жителей, в основном молодежи, в места с более доступным жильем.

Предположим, что продукция городской промышленности идет на удовлетворение потребительских нужд населения или экспортируется.

Развитие городской системы описывается динамической моделью [2], представляющей собой систему трех нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, дополненную соответствующими начальными условиями:

$$\begin{cases} \dfrac{dX}{dt} = a_1(a_2 Y - a_3 X), \\ \dfrac{dY}{dt} = c_1(c_2 X - c_3 Y) - c_4 X Z, \\ \dfrac{dZ}{dt} = d_1 \cdot XY - d_2 \cdot Z, \end{cases} \quad (1)$$

где a_i, c_j, d_k – положительные числа.

Модель (1) содержит девять параметров: $i + j + k = 9$, $i = \overline{1,3}; j = \overline{1,4}; k = 1,2$.

Коэффициент a_2 характеризует номинированный на душу населения спрос на продукцию, производимую в рассматриваемом городе. Параметр a_3 интерпретируется как уровень предложения продукции внутри города. В соответствии с принятыми определениями, $a_2 Y$ выражает общий спрос жителей на выпускаемую продукцию, $a_3 X$ – общий поток произведенной продукции на городской рынок. Таким образом, первое уравнение системы (1) показывает, что скорость изменения производства городской продукции пропорциональна избытку спроса: если спрос превышает предложение, то производство имеет тенденцию к расширению, и наоборот. Параметр a_1 имеет смысл скорости установления. Цена на жилье в данной модели не влияет на уровень производства.

Второе уравнение модели описывает изменение численности городского населения. Коэффициент c_2 интерпретируется как спрос на труд со стороны фирм для производства единицы продукции. Следовательно, $c_2 X$ – это общий спрос на данный ресурс на городском рынке труда. Параметр c_3 задает отношение численности городских жителей, занятых в экономике города или находящихся в поиске работы, к общей численности городского населения. Слагаемое $c_3 Y$ характеризует общую величину предложения на

городском рынке труда, а разность $c_2 X - c_3 Y$ описывает избыток спроса на труд в городе и, следовательно, определяет направление миграции. На уровень миграции влияет также уровень цен на жилье, т. к. люди стараются выбирать для проживания местности с невысокой стоимостью жилья. Член $c_4 XZ$ описывает это обстоятельство.

Третье уравнение системы (1) построено с учетом предположения о том, что при очень высоком уровне цен на рынке жилья дальнейшее увеличение цены весьма затруднительно, а при низком уровне дальнейшее снижение тормозится.

Введем новые переменные с помощью преобразования масштаба по формулам:

$$t_H = c_1 c_3 t,$$

$$x(t) = \left(\frac{c_4}{d_1}\right)^{1/2} \frac{d_1 \cdot X(t)}{c_1 c_3},$$

$$y(t) = \left(\frac{c_4}{d_1}\right)^{1/2} \frac{d_1 \cdot a_2 Y(t)}{a_3 c_1 c_3}, \qquad (2)$$

$$z(t) = \frac{c_4 a_2 Z(t)}{a_3 c_1 c_3}.$$

В последующих выкладках индекс «*H*» у временной координаты опущен.

В новых переменных система обыкновенных дифференциальных уравнений (1) приобретает вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = -\sigma x + \sigma y, \\ \dfrac{dy}{dt} = rx - y - xz, \\ \dfrac{dz}{dt} = xy - bz. \end{cases} \qquad (3)$$

Задача (3) содержит три безразмерных параметра:

$$\sigma = \frac{a_1 a_3}{c_1 c_3}, \quad r = \frac{a_2 c_2}{a_3 c_3}, \quad b = \frac{d_2}{c_1 c_3}. \qquad (4)$$

Автономная система уравнений (3) идентична потоковой модели, известной под названием *триплета Лоренца*, полученной и численно исследованной в [4]. Тот факт, что модель Лоренца применима для описания эволюции систем различной природы, подтверждает возможность единого подхода к изучению социальных и естественнонаучных проблем, обусловленных согласованным взаимодействием элементов сложных открытых нелинейных систем.

Исследование модели градоформирования

Приведем результаты качественного исследования модели, позволяющего представить развитие городской системы без получения точной формы зависимости показателей ее состояния от времени. Качественный анализ динамической системы подразумевает изучение ее аттракторов [1]. К ним относятся неподвижные точки (отвечающие сбалансированным, уравновешенным состояниям), периодические решения (описывающие циклическое изменение показателей), странные аттракторы (ограниченные области в фазовом пространстве, заполненные неустойчивыми траекториями, по которым происходят случайные блуждания фазовой точки). В данной статье качественный анализ выполнен для линеаризации модели (3) в предположении малости отклонений фазовых переменных от состояния равновесия системы. Обсудим результаты качественного исследования.

При изменении параметра r в интервале $0 < r < 1$ система имеет единственное состояние равновесия, расположенное в начале координат $O(0, 0, 0)$. При $r > 1$ система имеет три состояния равновесия в точках $O(0, 0, 0)$; $A_1(\sqrt{b(r-1)}, \sqrt{b(r-1)}, r-1)$; $A_2(-\sqrt{b(r-1)}, -\sqrt{b(r-1)}, r-1)$.

Исследование характера найденных неподвижных точек и их устойчивости показывает, что в промежутке $\left[4\sigma - (\sigma + 1)^2\right]/(4\sigma) < r \le 1$ состояние равновесия $O(0, 0, 0)$ является устойчивым узлом, а при $r > 1$ эта неподвижная точка демонстрирует характер седла. Особые точки A_1 и A_2 в интервале значений $1 < r < \sigma(\sigma + b + 3)/(\sigma - b - 1)$ являются устойчивыми фокусами, а в диапазоне $r > \sigma(\sigma + b + 3)/(\sigma - b - 1)$ – неустойчивыми фокусами.

Таким образом, параметр r, характеризующий отношение спроса на труд и выпускаемую продукцию к предложению этих факторов, является бифуркационным: при сколь угодно малом превышении этим параметром указанных критических значений появляются альтернативные решения, и система переходит в качественно новые состояния.

В случае конечных возмущений общее решение системы нелинейных дифференциальных

уравнений (3) в аналитическом виде получить не удается. Ее частные решения найдены численно, методом Рунге–Кутты IV порядка [3], с помощью вычислительной системы MathCAD.

Зафиксируем значения параметров b = 8/3 и σ = 10, а значения параметра r будем плавно изменять и регистрировать устанавливающееся в счете состояние системы (3). Метод исследования эволюции с помощью анализа фазовых траекторий динамической системы был введен Л.И. Мандельштамом и А.А. Андроновым [1] и с тех пор активно используется при исследовании различных динамических явлений и процессов.

Как показывают результаты численного моделирования, эволюция состояний системы проходит через следующие этапы

1. При изменении параметра r в интервале $0 < r < 1$ переменные $x(t), y(t), z(t)$ с течением времени стремятся к состоянию равновесия $O(0, 0, 0)$. На рис. 1 *а* представлен трехмерный фазовый портрет системы (3) в пространстве (x, y, z) при значении параметра $r = 0{,}1$. Траектория системы начинается в точке $M_0(10, 10, 10)$. Рис. 1 *б* иллюстрирует поведение функции $x(t)$.

2. Первая бифуркация происходит при переходе параметра r через критическое значение r = 1. В диапазоне значений $1 < r < 13{,}92$ система имеет три состояния равновесия в точках O, A_1, A_2; причем точка O является седлом, имеющим двумерное устойчивое инвариантное многообразие и две выходящие траектории Γ_1 и Γ_2. Одна из них, для определенности Γ_1, стремится к устойчивому состоянию равновесия A_1, а другая Γ_2 – к устойчивому фокусу A_2. Перестройка фазового портрета показана на рис. 1 *в, г* при значении параметра r = 11. Сепаратрисы Γ_1 и Γ_2 проходят через неустойчивую точку и разделяют фазовое пространство на области с различным поведением. Данный режим обозначается S_1.

3. При последующем увеличении параметра r переход через значение r = 13,92 сопровождается появлением из каждой петли сепаратрисы седлового периодического движения L_1 и L_2 соответственно. В интервале значений $13{,}92 < r < 24{,}06$ траектория Γ_1 стремится к состоянию равновесия A_2, а другая траектория Γ_2 – к состоянию A_1 A_1. Данное поведение представлено на рис. 1 *д, е,* при r = 16. При этом фазовая траектория переходит в часть пространства, где характеристики принимают отрицательные значения, что лишает полученные результаты очевидного экономического смысла. Этот режим обозначается S_2.

4. Значение параметра r = 24,06 соответствует следующей бифуркации. При переходе r через это значение траектории Γ_1 и Γ_2 стремятся к седловым периодическим движениям L_1 и L_2 соответственно, что показано на рис. 1 *ж, з*. Седловая динамика проявляется в том, что для одних начальных условий движения L_1 и L_2 устойчивы, а для других – нет. Описанный режим обозначается S_3.

5. Если значение бифуркационного параметра превышает величину

$$r = \frac{\sigma(\sigma + b + 3)}{\sigma - b - 1}, \qquad (5)$$

в данном случае r = 24,7368, то возникает новый динамический режим развития системы, обозначаемый S_4, фазовый портрет которого, называемый *странным аттрактором*, изображен на рис. 1 *и, к* при r = 27. При этом траектория хаотическим образом блуждает из полупространства, соответствующего значениям $x > 0$, в полупространство $x < 0$ и обратно, формируя две почти плоских, перепутанных сложным образом, спирали. Причина подобного поведения системы заключается в необычайной чувствительности решения к изменению начальных условий. Даже незначительно отличающиеся начальные условия со временем приводят к различным конечным состояниям системы. Это значит, в частности, что в указанном диапазоне значений параметра r горизонт прогноза динамики города очень мал. Однако подчеркнем, что в случае странного аттрактора имеется строгая предсказуемость в смысле детерминированности закона эволюции: решение системы уравнений (3), как и для регулярных аттракторов, подчиняется теореме единственности и однозначно воспроизводится при фиксированных начальных условиях.

Построение бифуркационных диаграмм

Бифуркационная диаграмма представляет собой сводную карту найденных численно динамических режимов системы (3). Границы их существования $l_1 - l_5$ изображены на рис. 2 *а* на плоскости параметров (r, σ) при фиксированном значении параметра b = 8/3, характеризующего отношение коэффициентов влияния текущего значения цен на рынке жилья и текущей численности населения на скорости их изменения.

Для построения граничных кривых были произведены разрезы на плоскости (r, σ) так, что при

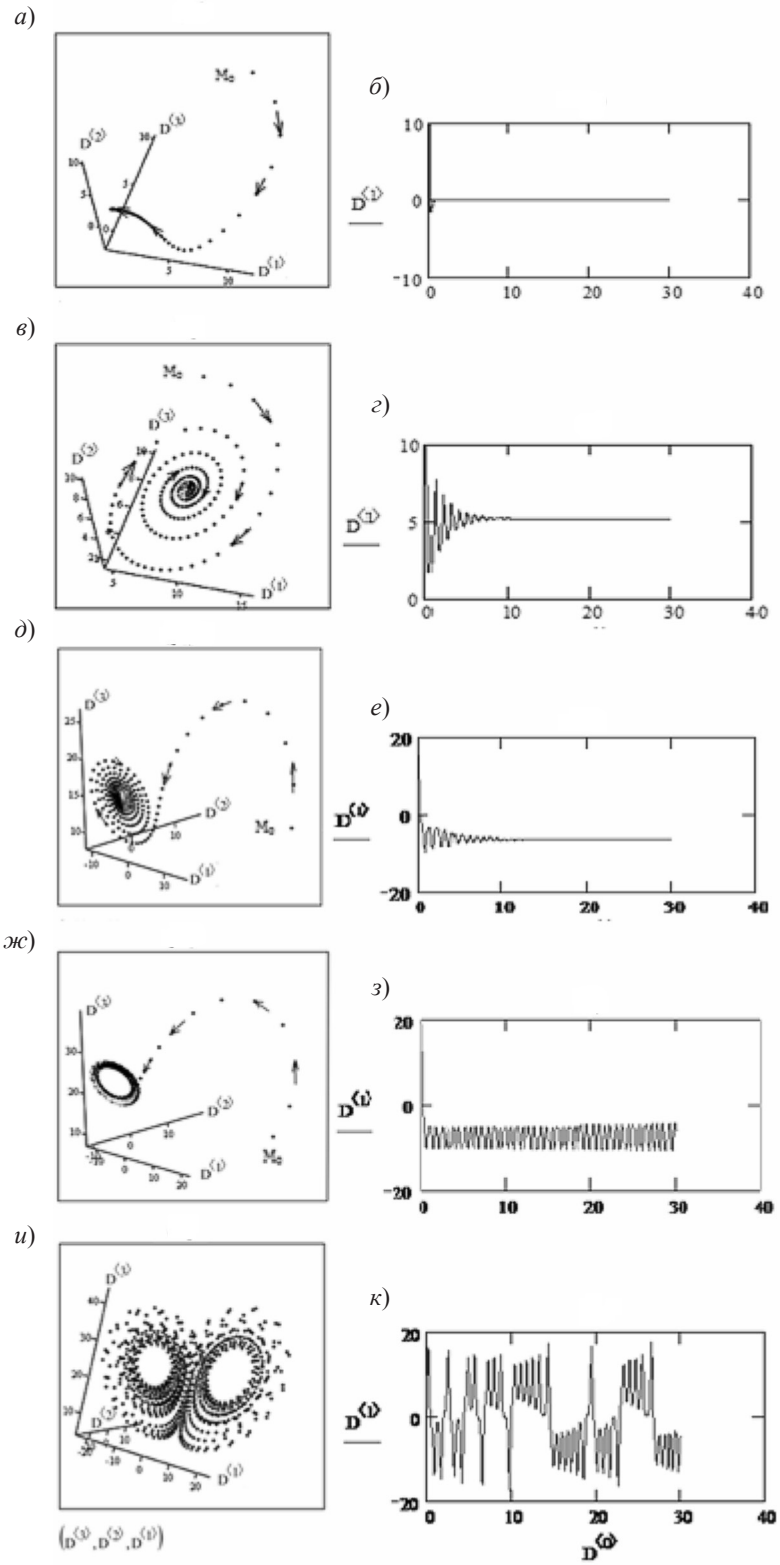


Рис. 1. Фазовые портреты системы в трехмерном пространстве переменных модели и виды зависимостей $x(t)$

Использованы обозначения $D^{<1>}$, $D^{<2>}$, $D^{<3>}$ для функций x, y, z соответственно; $D^{<0>}$ – для координаты t

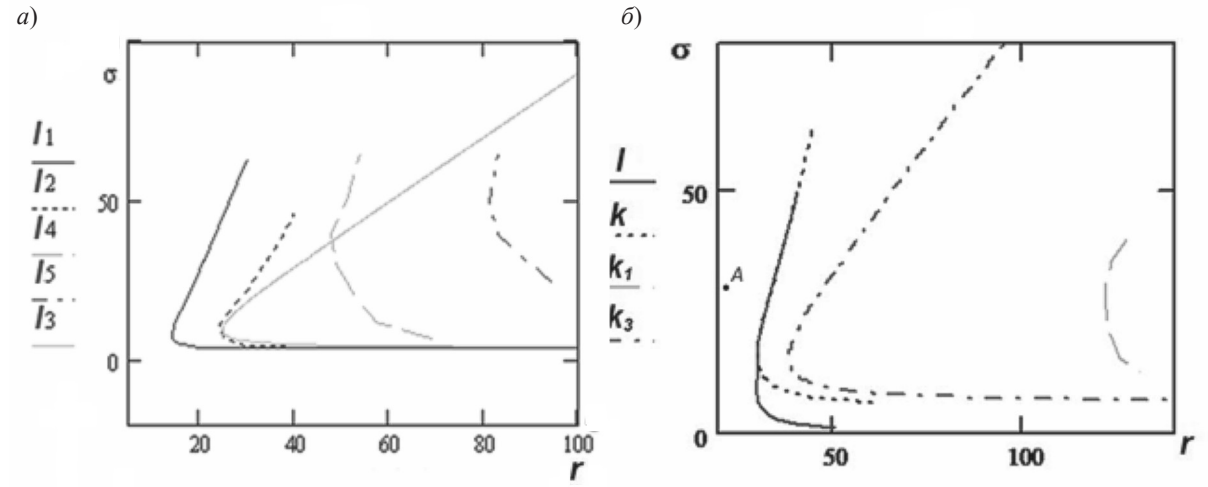


Рис. 2. Бифуркационные диаграммы на плоскости параметров (r, σ) при фиксированном значении параметра: *а* – $b = 8/3$ и *б* – $b = 5$

заданном значении параметра r увеличивали значения параметра σ до значения, соответствующего качественной перестройке режима развития системы. При переходе через бифуркационную кривую l_1 режим S_1 сменяется режимом S_2.

Например, при $r = 20$ система находится в состоянии S_1 в промежутке значений $\sigma \in [0; 4{,}13110074]$. При $\sigma \approx 4{,}131008$ система переходит в состояние S_2. Этот переход наглядно демонстрируют рис. 3 *а, б*. Новый режим S_2 существует при значениях параметра $\sigma \in [4{,}1311008; 28{,}3425691]$. При $\sigma \approx 28{,}3425692$ система переходит из состояния S_2 обратно в состояние S_1. Причем, с ростом r, по мере приближения к граничной кривой l_2, траектории Γ_1 и Γ_2 будут стремиться к седловым периодическим движениям L_2 и L_1 соответственно (режим S_3).

Внутри области, ограниченной кривой l_2, единственным притягивающим многообразием является аттрактор Лоренца (состояние S_4).

При увеличении параметра r число состояний, в которых может находиться система, возрастает. Так, например, при $r = 40$ диапазон значений параметра $\sigma \in [4{,}16700; 4{,}16766]$ соответствует состоянию S_3, а в промежутке $\sigma \in [4{,}116766; 46{,}628604]$ реализуется состояние S_4. Эту ситуацию иллюстрируют рис. 3 *в, г, д*.

Опишем методику построения граничных кривых, соответствующих различным видам петель сепаратрис седла O. На рис. 4 *а* представлен вид петли сепаратрисы, существующий в границах линии l_1. При переходе через эту границу происходит смена состояний S_1 и S_2 и каждая из сепаратрис Γ_1 и Γ_2 становится двояко-асимптотической к седлу O.

Следующим из рассмотренных типов сепаратрис являются траектории зарождающегося аттрактора Лоренца при переходе через граничную кривую l_2. Соответствующая область значений параметров (r, σ) находится справа от линии l_2.

На рис. 4 *б* изображен вид петли, полученный при значениях параметров $r = 57{,}33$ и $\sigma = 12$. Кривая l_4, задающая границы существования петли указанного вида, рассчитана продвижением вдоль разрезов на плоскости параметров (r, σ). Более сложное динамическое поведение системы приводит к появлению петли сепаратрисы, вид которой приведен на рис. 4 *в*.

Рассмотрим режимы развития системы в пределах представленной на рис. 2 *а* границы l_3, которая описывается уравнением (5). При значениях параметров (r, σ), соответствующих области между кривыми l_2 и l_3, в фазовом пространстве существуют три предельных множества: аттрактор Лоренца и состояния равновесия A_1 и A_2. Границей области притяжения аттрактора Лоренца являются устойчивые многообразия периодических движений L_1 и L_2. При приближении к кривой l_3 периодические движения L_1 и L_2 стягиваются к состояниям равновесия A_1 и A_2, при переходе через l_3 неподвижные точки A_1 и A_2 теряют устойчивость, что приводит к жесткому режиму возникновения стохастичности.

Для изучения влияния параметра b на динамику системы зафиксируем значение $b = 5$ и будем плавно повышать значение параметра r. После появления состояний равновесия A_1, A_2, являющихся устойчивыми узлами, рост значений параметра r приводит к бифуркации Хопфа,

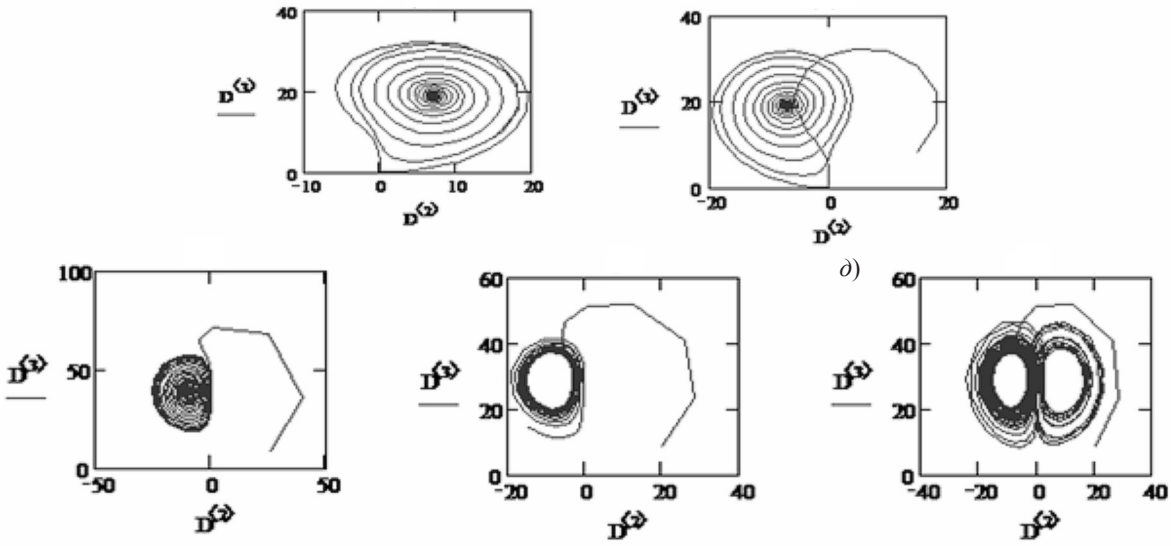


Рис. 3. Проекции фазового портрета системы на плоскость (y, z).
При r = 20: *а* – σ = 4,1311007; *б* – σ = 4,1311008. При r = 40: *в* – σ = 4,16700; *г* – σ = 4,16766; *д* – σ = 4,16767

к зарождению режима предельного цикла, когда показатели состояния системы совершают регулярные колебания около некоторых средних значений. По мере дальнейшего увеличения r динамика фазовых переменных соответствует режиму детерминированного хаоса.

Границы существования различных режимов сведены в бифуркационную диаграмму, представленную на рис. 2 *б*. Приближение к граничной кривой l соответствует формированию режима регулярных колебаний фазовых переменных. При переходе через кривую l возникает аттрактор Лоренца. При этом значения, принимаемые переменной y, выходят за пределы области допустимых значений.

Определим диапазон значений параметров,

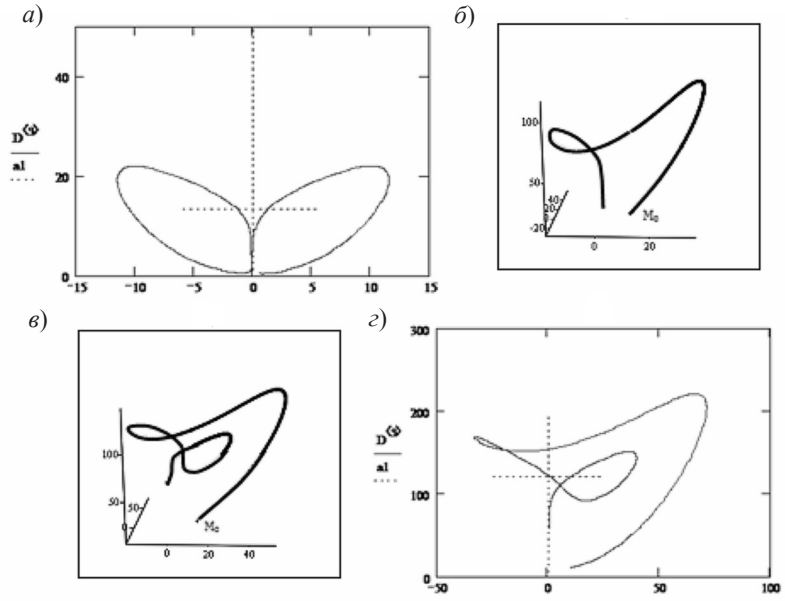


Рис. 4. Фазовые портреты системы:
а – на плоскости (x, z) при b = 8/3, σ = 10, r = 13,92;
б – трехмерный фазовый портрет при b = 8/3, σ = 12, r = 57,33;
в – трехмерный фазовый портрет при b = 8/3, σ = 25, r = 94;
г – на плоскости (x, z) при b = 5, σ = 20, r = 122,6

соответствующий допустимому множеству. Численные результаты дают кривую k на рис. 2 *б*. Кривые l и k разбивают плоскость параметров (r, σ) на три области. С точки зрения экономической целесообразности, представляет интерес набор значений параметров, характерных для установления режима устойчивого фокуса. График кривой, отделяющей область существования у системы (3) петель сепаратрис седла O, приведен на рис. 2 *б* с обозначением k_1 (соответствующий фазовый портрет представлен на рис. 4 *г*). Кривая, описываемая уравнением (5), при переходе через которую фокусы A_1 и A_2 теряют устойчивость, на рис. 2 *б* обозначена k_3.

Интерпретация результатов моделирования на реальных данных

Для демонстрации возможностей рассмотренной модели применим описанную методику к анализу реальной ситуации, характерной для социально-экономического развития Пермского края за 2005 г. Рассмотрим следующие социально-экономические показатели, публикуемые Госкомстатом [7]: X – объем валового регионального продукта (ВРП); Y – численность населения региона; Z – средние цены на первичном рынке жилья. Федеральной службой государственной статистики были зафиксированы следующие значения переменных: $X = 0{,}3389157 \cdot 10^6$ млн руб., $Y = 0{,}27480 \cdot 10^4$ тыс. человек, $Z = 0{,}019408 \cdot 10^6$ млн руб. за кв. м площади.

Определим параметры модели. Для первого уравнения в качестве параметра a_2, характеризующего спрос на продукцию, производимую в регионе, будем рассматривать значение фактического конечного потребления домашних хозяйств на территории региона в текущих рыночных ценах, которое равно 207 690,4 млн руб. В расчете на одного жителя Пермского края данный параметр $a_2 = 0{,}75579$. Определим значение параметра a_3, характеризующего уровень предложения продукции внутри региона, как отношение величины, равной объему валового регионального продукта минус валовое накопление основного капитала минус объем экспорта плюс объем импорта, к полному объему ВРП. Госкомстатом зафиксированы следующие значения: объем экспорта в страны дальнего зарубежья – 2 565,7 млн долл. США, в страны СНГ – 415 млн долл. США, объем импорта из стран дальнего зарубежья – 247,4 млн долл., из стран СНГ – 73,1 млн долл США. В пересчете по среднему курсу доллара США за 2005 г., установленному Центральным банком России равным 28,314 руб. [8], полный объем экспорта (включая страны дальнего зарубежья и страны СНГ) равен 84 395,54 млн руб., полный объем импорта 9 074,64 млн руб. Валовое накопление основного капитала равно 59 078,6 млн руб.

В итоге внутри региона остается продукции на 204 516,20 млн руб., следовательно, $a_3 = 0{,}60344$. Параметр a_1, имеющий смысл скорости установления объема ВРП, определим исходя из динамики ВРП за 2004–2006 гг. По данным ГКС, объем ВРП за 2004 и 2006 гг. равен 266 325,9 млн руб. и 383 770,1 млн руб. соответственно. За три года среднее изменение ВРП составляет 58 722 млн руб. Следовательно, $a_1 = 18{,}5$.

Определим параметры второго уравнения, описывающего динамику изменения численности населения. Параметр c_2 вычислим как отношение суммы среднегодовой численности занятых в экономике (1 318,9 тыс. человек) и потребности в работниках, заявленной организациями в органы государственной службы занятости (8 745 человек), к полному объему ВРП. Тогда $c_2 = 0{,}391733$. Коэффициент c_3 выражает уровень предложения труда в регионе, поэтому определим его как отношение суммы среднегодовой численности занятых в экономике и численности зарегистрированных безработных (21,6 тыс. человек) к общей численности населения. Отсюда $c_3 = 0{,}487809$ Значения коэффициента c_1, имеющего смысл скорости установления численности населения, и c_4, определяющего влияние цены жилья на текущее значение численности, находим исходя из динамики численности населения за период с 2004 по 2006 г.. В 2004 г. было зафиксировано 2770 тыс. человек, а в 2006 г. – 2731 тыс. человек Анализируя изменение численности населения за три года, значения коэффициентов оказываются равными $c_1 = 0{,}816$; $c_4 = 0{,}0795$.

Рассмотрим третье уравнение, выражающее скорость изменения уровня цен на первичном рынке жилья. Коэффициент влияния объема ВРП и численности населения на цены жилья d_1 и коэффициент влияния цены жилья на ее текущее значение d_2 определяем согласно динамике цен на первичном рынке жилья за 2004–2006 гг. В 2004 г. были установлены цены 15 189,7 руб./м^2, в 2006 г. – 29 236,2 руб./м^2. С учетом средней величины прироста цены жилья за три года получим: $d_1 = 0{,}49$ и $d_1 = 1{,}99$.

Найденные значения параметров модели дают следующие значения безразмерных критериев (4): σ = 28,05; r = 1,006; b = 5.

При указанных значениях параметров система (3) с течением времени сходится к равновесному решению с координатами $A(x^*, y^*, z^*)$:

$$x^* = 0{,}170018;\ y^* = 0{,}170018;\ z^* = 0{,}00578. \quad (6)$$

Обозначим положение точки $A(x^*, y^*, z^*)$ на бифуркационной диаграмме (рис. 2 *б*). Эта точка попадает в область, соответствующую, по результатам качественного анализа, состоянию *устойчивого фокуса*.

Реальные величины переменных, определенные по данным [7], после преобразования (2) принимают значения $\overline{x} = 0{,}168048$; $\overline{y} = 0{,}170656$; $\overline{z} = 0{,}00485$, которые удовлетворительно согласуются с результатами моделирования (6).

Математическое моделирование градоформирования, выполненное в данной статье, подтвердило возможность изучения процесса с помощью детерминированной динамической системы. Построенные по результатам расчетов бифуркационные диаграммы состояний и фазовые портреты в проекциях на плоскости различных динамических переменных дают возможность прогнозировать значения искомых показателей при изменении параметров задачи. Знание динамики фазовых переменных позволяет изучить сложную структуру окрестности критических точек и дать описание асимптотического поведения системы. Интерпретация уравнений использованной модели в контексте проблем городского производства и миграции населения позволяет применить полученные результаты для объяснения феномена развития городов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андронов, А.А.** Качественная теория динамических систем второго порядка [Текст]/А.А. Андронов, Е.А. Леонтович, И.И. Гордон [и др.].–М.: Наука, 1966.

2. **Занг, В.Б.** Синергетическая экономика [Текст]/ В.Б. Занг.–М.: Мир, 1999.

3. **Калиткин, Н.Н.** Численные методы [Текст]/ Н.Н. Калиткин.–М.: Наука, 1978.

4. **Lorenz, E.N.** Deterministic Nonperiodic Flow [Текст]/E.N. Lorenz//Journal of the Atmospheric Sciences. –1963.–№ 20.–P. 130–141.

5. **Haag, G.** Active Stabilization of a Chaotic Urban System [Текст]/G. Haag, T. Hagel, T. Sigg// Discrete Dynamics in Nature and Society.–1997.–№ 1. –P. 127–134.

6. **Haken, H.** A synergetic approach to the self-organization of cities and settlements [Текст]/H. Haken, J. Portugali//Environment and Planning B. –1995. –№ 22. –P. 35–46.

7. [Электронный ресурс] http://www.gks.ru/doc_2005/region/soc-pok.zip

8. [Электронный ресурс]http://www.cbr.ru/currency_base/dynamics.aspx

УДК 621.43

Ю.Д. Шевцов

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ СМАЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЭС КАК ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Для широкого круга вопросов исследование динамики течения жидкости в системе смазки как в пневмогидравлической системе, может быть ограничено решением линейных и линеаризованных уравнений. Кроме того, если рассматривать устройства системы смазки как элементы с сосредоточенными параметрами [1], то процессы в них могут быть описаны обыкновенными дифференциальными уравнениями. Такой подход к описанию указанных устройств, в т. ч. и элементов очистки, достаточно обоснован, поскольку наибольшие частоты их в системах смазки составляют десятки герц, а размеры элементов редко превышают один метр.

Построение моделей элементов системы смазки предлагается осуществлять по следующей методике, изложенной в [2]:

1. определение экспериментальных логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик очистителя (ЛАЧХ и ЛФЧХ);

2. получение вида передаточной функции по ЛАЧХ и ЛФЧХ;

3. синтез схемы замещения в электрических аналогах элемента системы смазки по виду передаточной функции с учетом его конструктивных особенностей.

Определение экспериментальных ЛАЧХ и ЛФЧХ отдельных элементов системы смазки осуществлялось согласно программе испытаний на разработанном испытательном стенде. При исследовании частотных характеристик фильтров использовались фильтроэлементы, проработавшие в системе смазки различное количество времени. Кроме того, использовались искусственные загрязнители, позволяющие моделировать различные эксплуатационные режимы дизельных двигателей. Определение частотных характеристик осуществлялось следующим образом.

На вход элемента очистки подавался синусоидальный сигнал пульсации давления масла:

$$y(t) = A_0 \sin \omega_i t, \qquad (1)$$

где A_0 – постоянная амплитуда входного сигнала; ω_i – круговая частота, изменяющаяся в процессе эксперимента.

На выходе элемента регистрировался сигнал:

$$x(t) = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \qquad (2)$$

где A_i – амплитуда выходного сигнала; φ_i – сдвиг фаз между выходным и входным сигналами.

Из полученных осциллограмм находятся значения $20\lg\frac{A_i}{A_0}$ и φ_i, и наносятся на логарифмическую систему (рис. 1).

Получение вида передаточной функции по ЛАЧХ и ЛФЧХ производится путем сопоставления наклонов в децибелах на декаду экспериментальных частотных характеристик исследуемых элементов и характеристик типовых динамических звеньев [3]. Такое сопоставление позволяет определить вид передаточной функции. Ее можно представить в виде последовательно соединенных типовых динамических звеньев.

Проверка правильности осуществляется путем аппроксимации экспериментальных частотных характеристик полученной передаточной функцией испытуемого элемента. Полученная передаточная функция полнопоточного масляного фильтра дизеля К-770 с сетчатыми фильтроэлементами состоит из трех последовательно соединенных типовых динамических звеньев (рис. 2).

Передаточные функции последовательно соединенных звеньев определяются по выражениям:

$$\left.\begin{aligned} W_1(s) &= \frac{k}{T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1}; \\ W_2(s) &= T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1; \\ W_3(s) &= \frac{1}{T_3^2 s^2 + 2\xi_3 T_3 s + 1}. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

В соответствии с правилом для последовательно соединенных динамических звеньев полу-

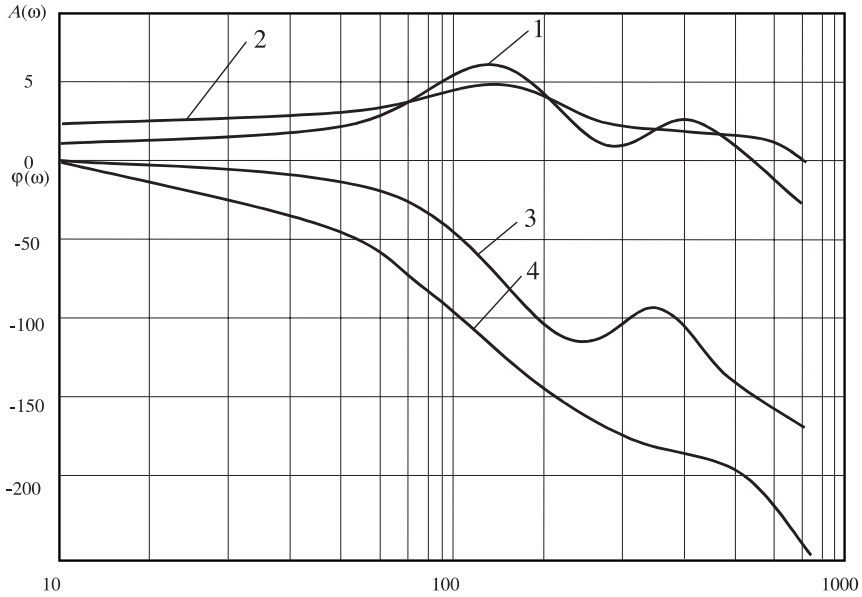


Рис. 1. Экспериментальные логарифмические частотные характеристики:
1,3 – ЛАЧХ и ЛФЧХ масляного фильтра; 2,4 – ЛАЧХ и ЛФЧХ реактивной масляной центрифуги

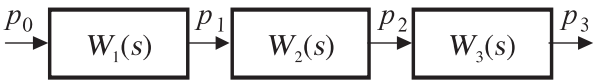


Рис. 2. Структурная схема передаточной функции масляного фильтра

чим эквивалентную передаточную функцию для масляного фильтра:

$$W_{\phi}(s)=\frac{k(T_2^2s^2+2\xi_2T_2s+1)}{(T_1^2s^2+2\xi_1T_1s+1)(T_3^2s^2+2\xi_3T_3s+1)}. \quad (4)$$

Синтез схемы замещения заключается в том, что дополнительно составляются конструктивная и гидравлическая схемы замещения очистителя, которые позволяют учесть особенности прохождения масла через элементы его конструкции. Такие элементы, в соответствии с теорией подобия, можно представить простейшими идеализированными звеньями с сосредоточенными параметрами в виде сопротивления, емкости и индуктивности. Полученные в результате моделирования схемы замещения полнопоточного сетчатого масляного фильтра представлены на рис. 3.

Передаточные функции очистителей можно получить аналитически, составляя уравнения по их схемам замещения в электрических аналогах, используя обобщенные законы Кирхгофа.

Уравнения, составленные по схеме замещения масляного фильтра, показанной на рис. 3 *в* с использованием метода контурных потоков, представлены системой:

$$\left.\begin{aligned}
&\delta\overline{G}_0-\delta\overline{G}_{\tau e1}-\delta\overline{G}_{R2}-\delta\overline{G}_{R3}=0;\\
&\delta\overline{G}_{R3}-\delta\overline{G}_{R4}-\delta\overline{G}_1=0;\\
&\delta\overline{G}_0\cdot R1+\tau u1\cdot\frac{d(\delta\overline{G}_0)}{dt}+\frac{1}{\tau e1}\cdot\int\delta\overline{G}_{\tau e1}\cdot dt-\delta\overline{P}_0=0;\\
&\delta\overline{G}_{R3}\cdot R3+\frac{1}{\tau e2}\cdot\int\delta\overline{G}_{R3}\cdot dt+\delta\overline{G}_{R4}\cdot R4+\tau u2\cdot\frac{d(\delta\overline{G}_{R4})}{dt}\\
&+\frac{1}{\tau e3}\cdot\int\delta\overline{G}_{R4}\cdot dt-\delta\overline{G}_{R2}\cdot R2=0;\\
&\delta\overline{P}_1-\frac{1}{\tau e3}\cdot\int\delta\overline{G}_{R4}\cdot dt-\tau u2\cdot\frac{d(\delta\overline{G}_{R4})}{dt}-\delta\overline{G}_{R4}\cdot R4=0;\\
&\delta\overline{G}_0\cdot R1+\tau u1\cdot\frac{d(\delta\overline{G}_0)}{dt}+\delta\overline{G}_{R2}\cdot R2-\delta\overline{P}_0=0.
\end{aligned}\right\}$$

Используя преобразование Лапласа, запишем передаточную функцию по отклонению давлений:

$$W_{\phi}(s)=\frac{\delta\overline{P}_1}{\delta\overline{P}_0}=\frac{k(T_2^2s^2+2\xi_2T_2s+1)}{(T_1^2s^2+2\xi_1T_1s+1)(T_3^2s^2+2\xi_3T_3s+1)}. \quad (5)$$

Выражения для передаточных функций, полученных экспериментально (4) и по синтезированной схеме замещения (5), имеют одинаковый вид. Это говорит о правильности выбранной модели

Модуль и аргумент выражения $W_{\phi}(s)$ определяют амплитудную и фазовую частотные характеристики масляного фильтра:

$$A_{\phi}(\omega)=\frac{k\sqrt{(1-T_2^2\omega^2)^2+4\cdot\xi_2^2T_2^2\omega^2}}{\sqrt{(1-T_1^2\omega^2)^2+4\cdot\xi_1^2T_1^2\omega^2}\cdot\sqrt{(1-T_3^2\omega^2)^2+4\cdot\xi_3^2T_3^2\omega^2}};$$

$$\varphi_{\phi}(\omega)=-\operatorname{arctg}\frac{2\cdot\xi_1T_1\omega}{1-T_1^2\omega^2}+\operatorname{arctg}\frac{2\cdot\xi_2T_2\omega}{1-T_2^2\omega^2}-\operatorname{arctg}\frac{2\cdot\xi_3T_3\omega}{1-T_3^2\omega^2},$$

где $k=\frac{R_2}{R_1+R_2}$ – коэффициент усиления, определяющий перепад давления на фильтре; $T_1=\sqrt{\frac{R_2\tau_{u1}\tau_{e1}}{R_1+R_2}}$, $T_2=\sqrt{\tau_{u2}\tau_{e3}}$, $T_3=\sqrt{\frac{\tau_{u2}\tau_{e2}\tau_{e3}}{\tau_{e2}+\tau_{e3}}}$ – постоянные времени; s – комплексная величина, введенная вместо оператора дифференцирования; ω – круговая частота; $\xi_1=\frac{\frac{R_1R_2\tau_{e1}+\tau_{u1}}{R_1+R_2}}{2\cdot\sqrt{\frac{R_2\tau_{u1}\tau_{e1}}{R_1+R_2}}}$, $\xi_2=\frac{R_4\tau_{e3}}{2\cdot\sqrt{\tau_{u2}\tau_{e3}}}$, $\xi_3=\frac{\frac{(R_3+R_4)\tau_{e2}\tau_{e3}}{\tau_{e2}+\tau_{e3}}}{2\cdot\sqrt{\frac{\tau_{u2}\tau_{e2}\tau_{e3}}{\tau_{e2}+\tau_{e3}}}}$ – коэффициенты демпфирования; $R_1=\frac{\delta\overline{P}_0-\delta\overline{P}_1}{P}$ – активная составляющая гидравлического сопротивления фильтра в безразмерной форме; $\delta\overline{P}_0,\delta\overline{P}_1$ – амплитуды вариаций давления масла на входе и выходе фильтра; P – масштабная величина давления; τ_{u1} – постоянная времени гидравлического сопротивления фильтрующей перегородки, учитывающая инерционность столба жидкости при дросселировании ее через поры фильтроэлемента; τ_{u2} – постоянная времени гидравлического сопротивления выходной трубки фильтра, учитывающая инерционность столба жидкости в ней; τ_{e1}, τ_{e3} – постоянные времени гидравлического сопротивления объема жидкости, находящегося в корпусе и выходной трубке фильтра, определяющие упругие свойства жидкости; τ_{e3} – постоянная времени гидравлического сопротивления объема жидкости, определяемая упругими свойствами фильтроэлемента.

Из представленных выше выражений видно, что существует однозначная зависимость коэффициентов k, ξ, T, входящих в формулы АЧХ и ФЧХ фильтра с постоянными R_2, R_3, R_4, τ_{u2}, τ_{e2} и изменяющимися R_1, τ_{u1}, τ_{e1}, τ_{e3} в процессе фильтрования масла значениями составляющих гидравлического сопротивления фильтра:

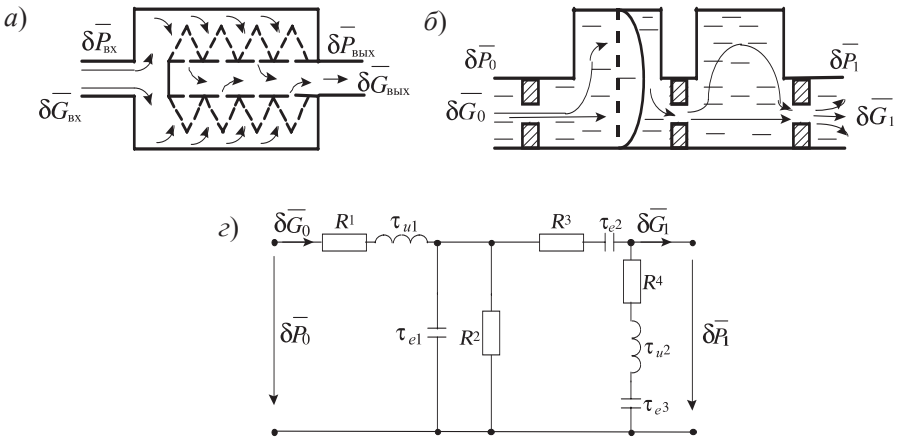


Рис. 3. Схемы замещения масляного сетчатого фильтра:
а – конструктивная; *б* – гидравлическая; *в* – в электрических аналогах

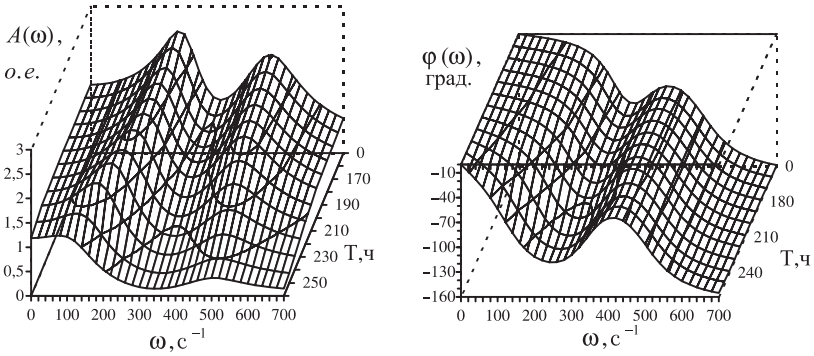


Рис. 4. Частотные характеристики масляного фильтра, соответствующие нормальной работе ДВС

$$\left.\begin{aligned} A_{\text{ф}}(\omega) &= f(R_1, \tau_{u1}, \tau_{e1}, \tau_{e3}); \\ \varphi_{\text{ф}}(\omega) &= f(R_1, \tau_{u1}, \tau_{e1}, \tau_{e3}). \end{aligned}\right\}$$

При изменении дисперсного состава загрязняющих примесей, поступающих в масло и оседающих на фильтрующей поверхности, будет изменяться характер зависимости между активной R_1 и инерционной τ_{u1} составляющими гидравлического сопротивления фильтра. Так, по мере загрязнения фильтра, определенным образом будут уменьшаться соотношения длины поры и суммарная площадь сечения отверстий пор в фильтрующем элементе. Это соотношение будет зависеть от толщины, плотности и дисперсного состава слоя отложений. Поступление в масло воды из системы охлаждения, топлива из системы топливоподачи и воздуха, вследствие нарушения герметичности системы смазки, влияют на емкостные составляющие τ_{e1}, τ_{e3} фильтра, зависящие от плотности $\rho_{\text{ж}}$ жидкости.

Построенные с помощью ЭВМ частотные характеристики данной модели фильтра с учетом изменения составляющих его гидравлического сопротивления, которые увеличиваются в процессе эксплуатации по мере загрязнения фильтрующих элементов, представлены на рис. 4.

Получена модель масляного фильтра, состоящая из гидравлической схемы замещения, схемы замещения в электрических аналогах и аналитических выражений, записанных в виде передаточной системной функции.

Данная модель позволит учитывать особенности изменения гидравлических параметров масляного фильтра по мере его загрязнения для различных эксплуатационных режимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гликман, Б.Ф.** Математические модели пневмогидравлических систем [Текст]/Б.Ф. Гликман.–М.: Наука, 1986.–386 с.

2. Технические возможности повышения ресурса автономных электростанций энергетических систем: Монография [Текст]/В.А. Атрощенко, Ю.Д. Шевцов, П.В. Яцынин [и др.].–Краснодар: Изд. Дом «Юг», 2010.–192 с.

3. **Попов, Д.М.** Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: Учебник для машиностроительных вузов [Текст]/Д.М. Попов.–М.: Машиностроение, 1976.–424 с.

Приборы, информационно-измерительные системы

УДК 62-50

Д.А. Кузнецов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ, АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ

Динамические модели систем широко применяются в различных науках и областях знаний современного общества. Это произошло благодаря тому, что такого рода модели позволяют получать прогноз поведения и развития изучаемого объекта на основании определенных знаний о его начальном состоянии и конкретных алгоритмов функционирования. При этом способы описания динамических систем разнообразны: с помощью дифференциальных уравнений, дискретных отображений, теории графов, теории марковских цепей и т. д. На сегодняшний день одним из наиболее актуальных направлений применения динамических моделей стали социальные и экономические системы. Важность проблемы прогнозирования для данных систем, возросла на фоне мировых экономических потрясений, когда конечным результатом ошибки при регулировании и управлении в реальных процессах экономики могут стать массовые увольнения, инфляция, дефляция, растраченные денежные и материальные резервы страны.

Вопросу поиска методов и возможностей построения динамических моделей для экономических систем посвящено большое количество научных работ и публикаций. Однако пока не найдено конкретного решения, позволяющего получать детализированную модель реальных экономических процессов, результаты расчета которой можно было бы верифицировать и составить прогноз на длительные периоды времени. Это сопряжено с необходимостью использования вероятностных параметров при построении, большой вычислительной сложностью и необходимостью учета взаимного влияния элементов системы. Основными инструментами при разработке формализованных динамических моделей для реальных процессов являются методы системного анализа, информационный подход А.А. Денисова и законы экономической теории.

Во многих научных и учебных изданиях дается определение экономики как науки об оптимальном, эффективном использовании редких, ограниченных экономических ресурсов с целью удовлетворения безграничных и постоянно меняющихся потребностей людей и общества в целом. Для оценки эффективности экономики введем параметр вероятности удовлетворения потребностей общества – p [2, с. 15]. Если принимать во внимание две основных аксиомы экономики, что потребности общества безграничны, а ресурсы ограничены, то зависимость эффективности экономики от вероятности степени удовлетворения потребностей будет иметь логарифмический вид:

$$H_0 = -\log(1 - p), \qquad (1)$$

где H – потенциал экономической системы, характеризующий состояние системы, при логарифме, имеющем основание 2, выражается в битах.

Экономическая система не пребывает в статичном состоянии. В ней происходят процессы обращения валового продукта через обмен к потреблению и новому воспроизводству. Это обращение, в общем случае, происходит не по замкнутому циклу, а по спирали, где каждый новый цикл приводит либо к увеличению национального продукта, либо к уменьшению. В классической теории приводится понятие цикла как периодически повторяющегося на протяжении ряда лет подъема и спада в экономике. Экономический цикл состоит из нескольких фаз (подъем, кризис, депрессия, оживление) с соответствующим изменением параметров системы. Так, модель экономики на

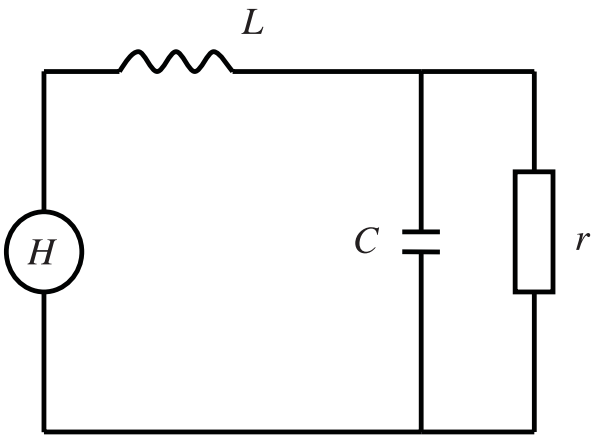


Рис. 1. Модель обращения ВНП
на верхнем уровне абстракции

верхнем уровне абстракции можно представить в графической форме в виде информационной цепи оборота ВНП (рис. 1).

Все процессы в цепи на рис. 1 описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} H = Ir + L\dfrac{dI}{dt} \\ Ir = \dfrac{1}{r}\int Icdt \\ I = Ir + Ic \end{cases} \qquad (2)$$

где I – это оборот ВНП; Ic и Ir – компоненты его составляющие на соответствующих элементах цепи; r – сопротивление обороту; C – емкость системы; L – ригидность системы.

Расширив модель (3) и добавив в нее необходимые компоненты, возможным станет реализация модели межотраслевого взаимодействия, макро-и мидиуровней экономики [1, с. 156]. Реальные экономические системы описываются взаимосвязанными подсистемами и элементами. На основе этого описания можно получить систему дифференциальных уравнений, позволяющую оценить поведение системы как в данный момент, так и через определенное заданное время. Например, описание развития предприятия как системы, можно задать формулой:

$$H_i = \frac{J_i}{n_i} + \tau_i \frac{dJ_i}{dt} + L_i \frac{d^2 J_i}{dt^2}\ , \qquad (3)$$

где n_i – количество элементов; J_i – информация об объеме в относительных величинах; τ_i – минимальное время реакции на изменения; L_i – ригидность системы.

Первое слагаемое в правой части уравнения (3) характеризует статическую составляющую системы (в нашем случае это может быть ее структура); второе слагаемое описывает работу системы; третье – ее динамику.

При анализе моделей в реальных приложениях значимой проблемой становится поиск численного решения дифференциальных уравнений высоких порядков, описывающих системы. Это связано с иерархическими отношениями подсистем и взаимного влияния элементов. Стандартные вычислительные средства не позволяют адекватно рассчитать результат с необходимой точностью, в связи с этим основным инструментом расчетов может быть среда автоматизированного проектирования ADS (Advanced Design System) Agilent Technologies [3, с. 278]. Данная среда проектирования позволяет проводить расчет переходных процессов с заданной точностью для моделей с учетом взаимосвязанных параметров и иерархии. Отдельная особенность использования ADS – возможность описания изменения параметров под влиянием внешних и внутренних возмущений в виде законов от времени. Воздействия при этом могут быть от ступенчатых, импульсных, гармонических до производных, задаваемых пользователем. Для контроля и управления изменением параметров в схему могут быть добавлены токовые пробники, необходимые для наглядного отображения изменения параметров оборота в каждой из интересующих подсистем.

Общий вид одной из конкретных моделей при реализации в САПР приведен на рис. 2.

Результаты расчета переходных процессов (рис. 3) позволяют исследовать поведение отдельных подсистем при изменении каких-либо параметров. Отдельным достоинством при вычислении и прогнозировании интересующих нас параметров является возможность получать расчет не только переходных процессов, но и гармонического баланса, и расчета при установившихся режимах. Последовательный набор значений оборотов и потенциалов для ветвей цепи после расчета переходных процессов позволит получить тренд, характеризующий ход развития системы в целом.

В статье представлена автоматизированная информационная система для прогнозирования

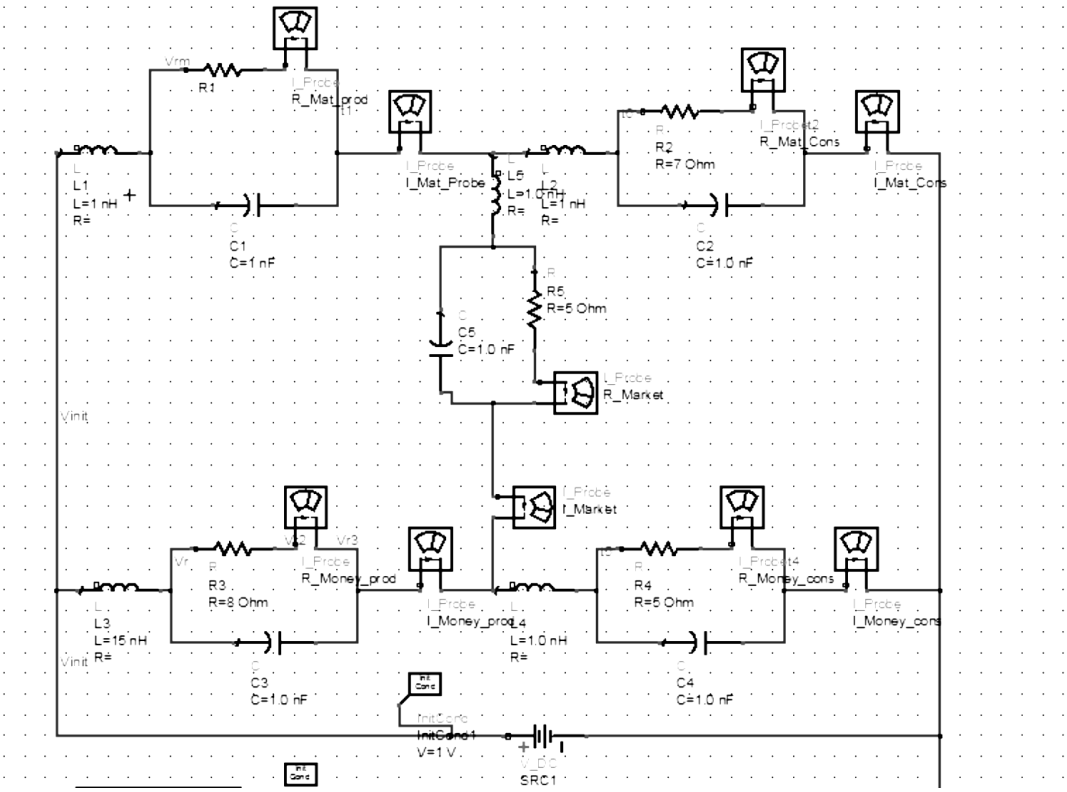


Рис. 2. Общий вид схемы моделирования

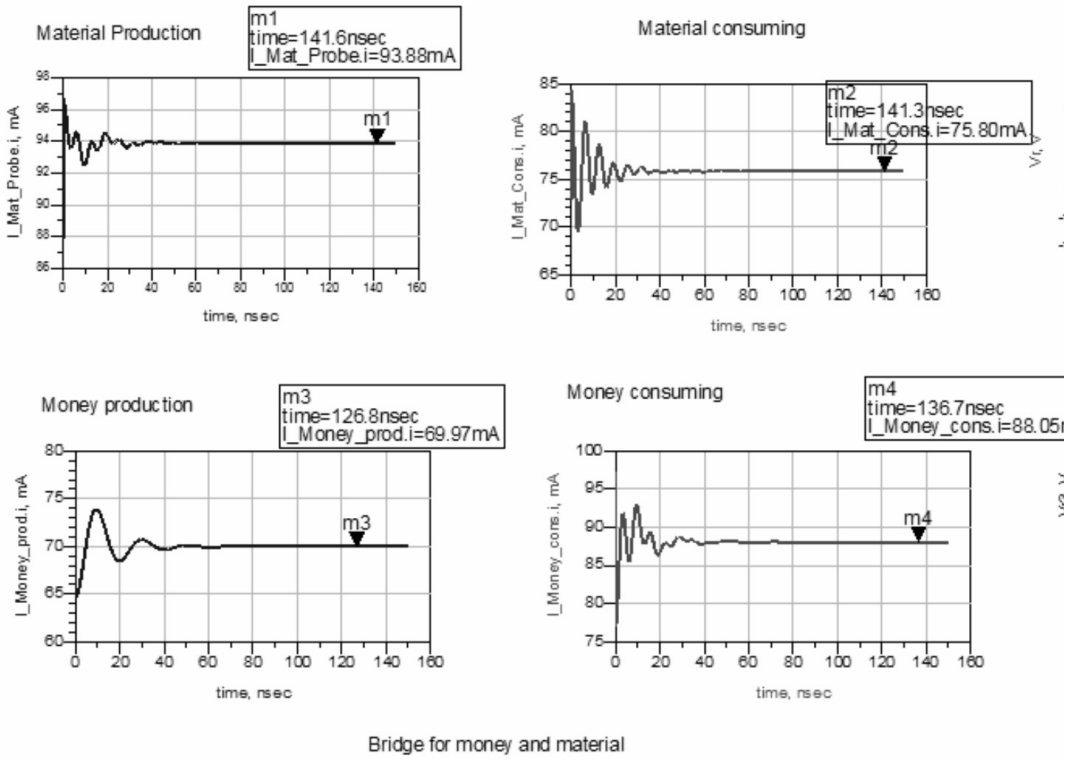


Рис. 3. Графики переходных процессов

и исследования динамических процессов в экономике с учетом иерархии и взаимного влияния параметров. В ходе разработки динамических моделей были определены общие алгоритмы их построения и проведены аналогии с экономическими законами.

Предлагаемые решения отличаются следующими конкретными новациями:

возможность учета и анализа динамики развития экономических систем при многофакторном влиянии;

возможность прогнозирования развития существующих экономических систем;

оценка и прогноз последствий принятия инвестиционных проектов;

использование САПР позволяет получать численные решения для задач высоких порядков;

возможность учета иерархических связей отрасль–регион–страна;

новизна по отношению к существующим западным решениям в виду возможности максимальной полноты описания.

В настоящее время некоторые результаты применения моделей, описанных в статье, были практически реализованы для небольших компаний (экономических систем), таких, как ООО «ВОСТОРГ», ЗАО «ВОСТОРГ-НЕВА». Однако наибольшую ценность данные модели имеют на макроэкономическом уровне для всех отраслей экономики для прогнозирования ситуации на рынках в условиях экономической нестабильности. Результаты исследований могут иметь достаточно высокую ценность для государственных институтов инвесторов и экономистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Денисов, А.А.** Современные проблемы системного анализа: Учебник [Текст]/А.А. Денисов, В.Н. Волкова.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. –304 с.

2. **Денисов, А.А.** Макроэкономическое управление и моделирование: Изд. 2-е [Текст]/А.А. Денисов.–СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006.–72 с.

3. **Денисов, А.А.** Динамическое моделирование экономических процессов [Текст]/А.А. Денисов, Д.А. Кузнецов//В сб. XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Матер. науч.-практ. конф., ч. VII.–СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. –С. 417.

УДК 681.518.3:004.056

О.Н. Шалаевский, Г.Ф. Малыхина

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА БАЗЕ ОБЩИХ КРИТЕРИЕВ

Проблема обеспечения безопасности информационных технологий занимает все более значительное место в построении измерительных информационных систем (ИИС) по мере автоматизации все большего количества измерительных процессов. Обеспечение безопасности информационных технологий – комплексная задача, которая решается в направлениях правового регулирования применения ИТ, совершенствования методов и средств их разработки, развития системы сертификации, обеспечения соответствующих организационно-технических условий эксплуатации. Один из основных аспектов решения проблемы безопасности ИТ – выработка системы требований, критериев и показателей для оценки уровня безопасности ИТ.

В России изложенный выше аспект реализован в виде «ГОСТ Р 15408» («Общие критерии», ОК) [1]. Он позволяет оценить безопасность измерительной информационной системы, однако при этом обладает одним существенным недостатком: декларированные требования безопасности не формализованы и носят исключительно описательный характер.

В настоящей статье предлагается способ решения данной проблемы: построение онтологической модели безопасности измерительных информационных технологий на основе ОК (ОМБИИТОК).

Актуальность затронутой темы обусловлена, в основном, обособленностью и разрозненностью различных разработчиков ПО. По этой причине остро стоит проблема оценки уровня безопасности тех или иных ИИС. Кроме того, формализация ОК ведет к уменьшению роли экспертов по безопасности в процессе разработки ИИС, и, как следствие, к удешевлению проекта. Это обстоятельство, а также возможность производить независимую оценку ИИС, несомненно, способствует повышению качества разрабатываемого ПО.

Онтология – это формальная спецификация разделяемой концептуальной модели, дающая формализованное представление основных понятий исследуемой предметной области и связей между ними [2, 3]. В общем виде она может быть представлена следующим образом:

$$O = \{ X, R, F \}, \quad (1)$$

где X – множество понятий предметной области; R – множество отношений между понятиями; F – множество функций интерпретации (правила онтологии).

Общая схема применения онтологии для описания требований безопасности информационных технологий, и, впоследствии, формирования системы безопасности, представлена на рис. 1.

Описание ОМБИИТОК представляет собой совокупность понятий указанной предметной области, отношений между ними, а также множество примитивов, позволяющих их формализовать. Предметная область – это компиляция знаний, содержащихся в ОК и затрагивающих вопросы безопасности систем ИТ в целом со знаниями, полученными в результате исследования особенностей ИИС. Конфигурация ОМБИИТОК есть настроенная пользователем сборка объектов, определенных в модуле «Описание ОМБИИТОК», а также связей между ними, созданная для достижения поставленных конкретных целей безопасности. В качестве конфигурации ОМБИИТОК может выступить пакет требований безопасности, профиль защиты (ПЗ) или задание по безопасности (ЗБ) [1]. Формирование конфигурации ОМБИИТОК происходит при помощи инструментов и средств, содержащихся в модуле «Настройка и управление», на основе требований безопасности, полученных в результате анализа предположений, угроз и целей безопасности для конкретной измерительной информационной системы.

После обработки конфигурации ОМБИИТОК, в соответствии с имеющимися настройками, выходным продуктом является набор программных интерфейсов, реализующих заданную защит-

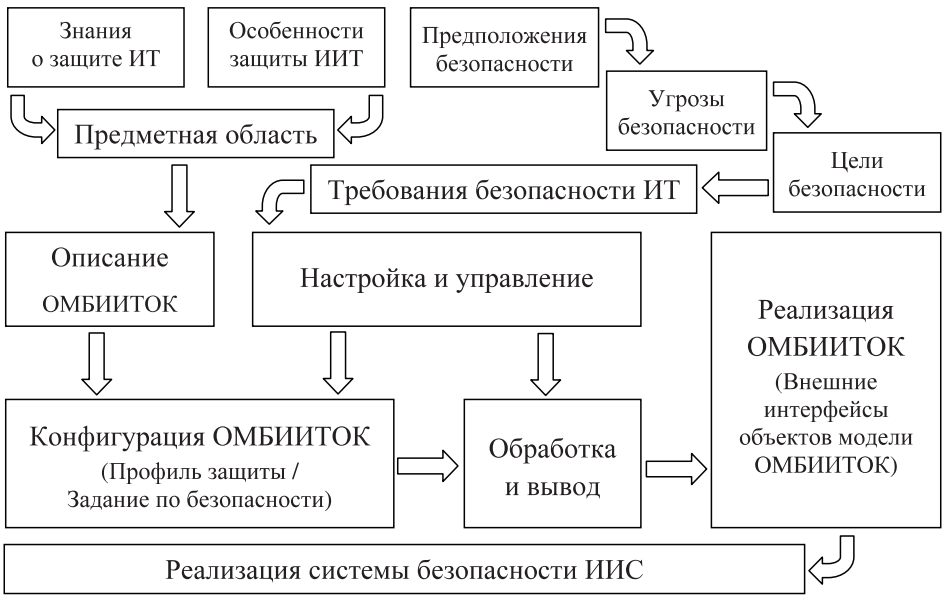


Рис.1. Этапы формирования системы безопасности ИИС на основе ОМБИИТОК

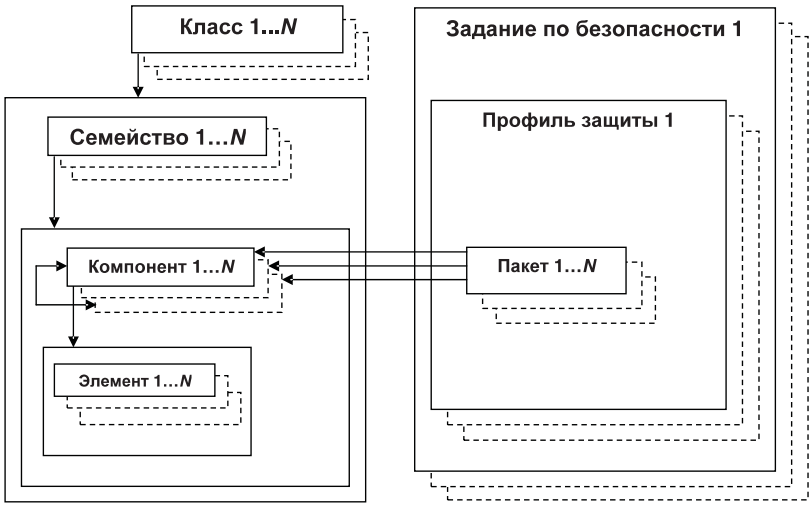


Рис. 2. Описание ОМБИИТОК

ную функциональность. Пользователю системы предоставляется возможность собственноручно реализовать полученные интерфейсы в соответствии с действующей в организации политикой разработки ПО и описательной информацией, содержащейся в ГОСТ Р 15408.

Основная цель данной статьи – демонстрация конструкций, применяющихся для модуля «Описание ОМБИИТОК».

Для ОМБИИТОК базовые понятия предметной области и связи между ними определяются на основании всех структур и конструкций, применяемых в ОК для описания функциональных требований безопасности и требований доверия.

В общем виде, базовые понятия исследуемой предметной области можно представить так

$$X = \{ Cs, Fy, Ct, Et, Pt, PP, ST \}. \quad (2)$$

В соответствии со стандартом «ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408» функциональные требования и требования доверия каталогизируются в виде вертикальной структуры (рис. 2). Наверху иерархии находятся классы требований (Cs), определяющие общие группы требований безопасности. Классы состоят из семейств (Fy) – специальных групп требований безопасности, имеющих общие цели безопасности, но различающихся акцентами или строгостью. Каждое семейство состоит из набора компонентов (Ct). Компонент является наименьшим выбираемым набором требований для включения в структуры, определяемые в ОК. Компонент, в свою очередь, состоит из элементов (Et) – неделимых требований безопасности.

Кроме того, в стандарте описаны базовые понятия, необходимые для гибкой настройки требований в зависимости от выбранных целей безопасности – пакет требований безопасности (Pt), ПЗ(PP) и ЗБ(ST). Как видно на рис. 2, это позволяет развивать базовую вертикальную структуру ОК в горизонтальном направлении и каталогизировать новые конфигурации сервисов безопасности в зависимости от различных наборов целей безопасности.

Отношения между базовыми понятиями (объектами X) строятся на основе наследственных связей, операции включения требований безопасности, а также межкомпонентных зависимостей:

$$R = \{ D(Ct_1, Ct_2), A, I \}. \quad (3)$$

Компоненты могут иметь зависимости (D) от других компонентов как функциональных требований безопасности ИТ, так и требований доверия. Зависимость означает неспособность целевого компонента Ct_1 выполняться при условии невыполнения компонента Ct_2, от которого он зависит:

$$A = \{ AR(Pt_1 \rightarrow Ct_{1 \div n}), AR(PP_1 \rightarrow (Pt_{1 \div n} \parallel Ct_{1 \div n})), AR(ST_1 \rightarrow PP_1) \}. \quad (4)$$

Агрегация (A) – представлена в виде операции включения требований безопасности, каталогизированных в части 2 ОК [2] в отдельные сущности, собранные по принципу решения конкретных целей безопасности ИТ. В качестве таких сущностей могут использоваться пакет требований безопасности, ПЗ или ЗБ. В соответствии с (4), существует три типа агрегации для разрабатываемой онто-

логии. Один пакет требований может включать в себя счетное количество компонентов. Каждый ПЗ может включать в себя один и более пакетов требований или компонентов, а ЗБ строится на базе одного профиля защиты и является его дополнением в области конкретной спецификации разрабатываемой ИИС:

$$I = \{ IR(Cs_1 \leftarrow Fy_{1\div n}), IR(Fy_1 \leftarrow Ct_{1\div n}), IR(Ct_1 \leftarrow Et_{1\div n})\}. \quad (5)$$

Как видно из отношения (5), все наследственные связи (IR) имеют тип отношения один ко многим. Это обусловлено вертикальной структурой хранения требований безопасности. На рис. 3 приведена диаграмма UML, описывающая наследственно-родственные отношения между программными интерфейсами, реализующими внутреннюю, скрытую от пользователя, структуру ОМБИИТОК. Необходимо отметить, что данные интерфейсы представляют интерес исключительно для внутренней реализации ОМБИИТОК. Это обусловлено тем, что пользователь ОМБИИТОК, в задачу которого входит только лишь управление функциями безопасности, не имеет прямого доступа к внутренним структурам, при помощи которых осуществляется построение и хранение иерархии требований безопасности в памяти. Класс (CCClass) является корневой сущностью по отношению к семейству (CCFamily). Как было определено выше, ни класс, ни семейство не несут никаких функциональных обязанностей, кроме описательного определения общей направленности и набора решаемых задач безопасности. Наиболее важным составляющим является компонент, который наследует свойства и методы от интерфейсов CCFamily и AbstractCCDependency. Первый отвечает за классово-семейственную принадлежность компонента, второй определяет список зависимостей компонента. Также в представленной модели сущность, скрывающаяся за интерфейсом CCComponent, всем подведомственным элементам ставит в соответствие необходимую функциональность.

Элемент определяет самый низкий уровень деления требований безопасности ИТ. В проектируемой ОМБИИТОК каждому элементу требований соответствует определенный интерфейс. Это означает, что, фактически, требования безопасности представлены в виде абстрактных классов (интерфейсов), а достижение заявленных целей безопасности осуществляется посредством реализации описанных в них виртуальных (абстрактных) методов.

Последнюю составляющую онтологии – множество функций интерпретации – можно описать следующим образом:

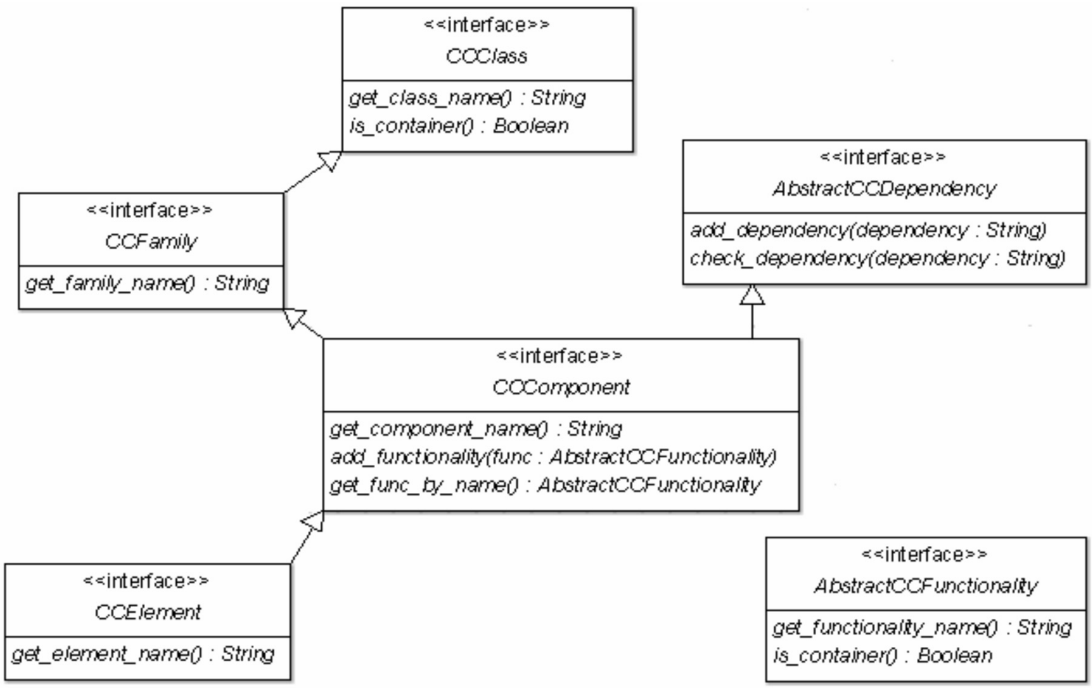


Рис. 3. Диаграмма, описывающая внутреннюю структуру ОМБИИТОК

$$F = \{ Fn (X, O, PS)_i \}. \quad (6)$$

Функции интерпретации (6) реализуются в ОМБИИТОК в виде макросов на языке программирования C++. При помощи этих макросов могут осуществляться любые операции (O) по изменению внутреннего состояния (инициализация и модификация объектов X, а также добавление, удаление и изменение связей R) онтологической модели, а также получения доступа к инкапсулированным в ней требованиям безопасности ИТ. Аргумент PS выполняет роль набора передаваемых и, в случае необходимости, возвращаемых параметров.

Каждый класс требований представлен в виде объекта, суть контейнера объектов. Обращение к каждому из элементов контейнера осуществляется через его адрес, т. е. последовательность узлов, через которые к нему лежит путь.

Однако перед получением доступа к объекту «класс» или к одному из объектов, которые он содержит, необходимо описать его в терминах разрабатываемой ОМБИИТОК. Для создания класса и инициализации его составляющих используется следующая комбинация макросов (рис. 4). Для примера создадим элемент FAU_GEN.1.1. Подробное описание указанного элемента содержится в каталоге функциональных требований безопасности – в части 2 стандарта [2]. В общих чертах, описание этого элемента можно представить следующим образом.

Класс FAU – аудит безопасности. Включает в себя распознавание, запись, хранение и анализ информации, связанной с действиями, относящимися к безопасности.

Семейство FAU_GEN – генерация данных аудита безопасности. Определяет требования по регистрации возникновения событий, относящихся к безопасности, которые подконтрольны функциям безопасности.

Компонент FAU_GEN.1 – генерация данных аудита. Определяет уровень событий, потенциально подвергаемых аудиту, и состав данных, которые должны быть зарегистрированы в каждой записи.

Элемент FAU_GEN.1.1 – функции безопасности, способные генерировать запись аудита для следующих событий, потенциально подвергаемых аудиту:

запуск и завершение выполнения функций аудита;

все события, потенциально подвергаемые аудиту, для которых существует возможность выбора между минимальным, базовым, детализированным, неопределенным уровнем аудита.

На рис. 4 приведен фрагмент кода, реализующий создание и использование класса FAU, содержащего единственный элемент FAU_GEN.1.1 в соответствии с приведенным выше описанием.

Данный фрагмент кода создает класс FAU, семейство FAU_GEN, компоненты FAU_GEN.1 и FAU_GEN.2, а также элемент FAU_GEN.1.1. Компонент FAU_GEN.2 не наполняется элементами, а FAU_GEN.1 инициализируется только одним элементом для наглядности.

Вначале создается объект типа CAuditGenerator<CUserID<ULONG>> (строка 5), который впоследствии, благодаря макросу CCFUNCTIONALITY_ADD (строка 17) будет выбран в качестве реализации абстрактного интерфейса IAuditEventLevel<AuditEventLevel, CUserID<ULONG>> и добавлен к функциональности элемента FAU_GEN.1.1. Последнее осуществляется с помощью макроса CCFUNCTIONALITY_ADD. Кроме того, на рис. 4 можно увидеть макрос CCDEPENDENCY_ADD (строка 16), который добавляет зависимость компонента FAU_GEN.1 от класса FPT, семейства FPT_STM, компонента FPT_STM.1. Подробное описание последнего компонента содержится в [1], однако, в общих чертах, можно отметить, что он отвечает за предоставление надежных меток времени, в данном конкретном случае, для корректной генерации событий аудита безопасности.

Таким образом, в итоге выполнения кода, ограниченного 1-й и 20-й строкой, в памяти будет создан контейнер с объектами различных типов, описываемых вышеопределенными интерфейсами. Для того чтобы из внешнего проекта получить доступ к функциональности требований безопасности ИТ, необходимо воспользоваться специальными макросами, использование которых продемонстрировано на строках 32–40 рис. 4.

Прежде чем использовать созданный заранее класс функциональных требований, необходимо подключиться к контейнеру, обеспечивающему доступ к объектам X и их хранение, а также проверить надежность установленного соединения. Эти задачи решают, соответственно, макросы CCCONNECT и CCCHECK_LINK (строки 32, 36). Далее, при попытке обратиться к методу

```
1       // Описание интерфейса элемента FAU_GEN.1.1
2       class CCFAU_main
3       {
4       CCCLASS(FAU)
5       CCDECLARE_OBJECT(CAuditGenerator<CUserID<ULONG> >,generator);
6       public:
7       CCCONTAINER_DECLARE(fau_class);
8       BEGIN_COMPONENT_MAP(FAU)
9       CCCONTAINER_CREATE(fau_class);
10      CCFAMILY_CREATE(fau_gen);
11      CCCOMPONENT_CREATE(fau_gen_1);
12      CCCOMPONENT_CREATE(fau_gen_2);
13      CCCLASS_SET(fau_class,"FAU");
14      CCFAMILY_ADD(fau_class,fau_gen,GEN,"GEN");
15      CCCOMPONENT_ADD(fau_class,»FAU_GEN»,GEN,fau_gen_1,1);
16      CCDEPENDENCY_ADD(fau_class,»FAU_GEN»,GEN,1,»FPT_STM»,1);
17      CCFUNCTIONALITY_ADD(fau_class,"FAU_GEN",1,"FAU_GEN.1.1",
        generator, IAuditEventLevel<AuditEventLevel,CUserID<ULONG>>);
18      CCELEMENT_ADD(fau_class,»FAU_GEN»,GEN,1,1,IAuditEventLevel<
        AuditEventLevel,CUserID<ULONG> >);
19      END_COMPONENT_MAP
20      };
21      ... // реализация интерфейса элемента FAU_GEN.1.1
22      template<class _AuditEventLevel,class TUserID>
23      class IAuditEventLevel
24      {
25      public:
26      virtual void SetAuditEventLevel(_AuditEventLevel)=0;
27      virtual _AuditEventLevel GetAuditEventLevel()=0;
        virtual bool GenerateAuditRecord
        (boost::shared_ptr<IAuditBaseEvent<TUserID> >)=0;
30      };
31      ... // тест элемента FAU_GEN.1.1
32      CCCONNECT(FAU)
33      void test(boost::shared_ptr<IAuditBaseEvent<TUserID> > &event)
34      {bool bret=false;
35      CCCHECK_LINK(FAU,btest1);
36      if(btest1==false)ErrorReturn("Класс FAU не загружен в память");
37      FAU("FAU_GEN",GEN,1,1,ptr1);
38      CC_PROC(ptr1)->SetAuditEventLevel(ael_minimal);
39      bret=GenerateAuditRecord (event);
40      }
```

Рис. 4. Инициализация и использование класса FAU

одного из интерфейсов, необходимо получить объект, содержащий на него указатель. Это можно сделать при помощи макроса FAU (строка 38). И, наконец, чтобы извлечь указатель и выполнить метод, можно воспользоваться макросами CC_PROC или CC_FUNC. Первый необходимо использовать только в том случае, если требуемый метод не возвращает значения. Отличие CC_FUNC заключается в том, что он предоставляет пользователю возможность получить возвращенное значение.

Как видно из реализации интерфейса элемента FAU_GEN.1.1 (строки 22–30), он состоит из методов, позволяющих получить доступ на запись и чтение свойства, в котором определяется уровень аудита, а также метода, осуществляющего непосредственно генерацию события аудита безопасности. Это полностью соответствует заданному выше описанию данного элемента.

В тестовом примере сначала устанавливается минимальный уровень аудита, а после этого выполняется генерация требуемого события аудита.

На основе данной онтологической модели разработана библиотека классов C++, которая была эффективно применена при разработке и проектировании системы обнаружения вторжений в измерительную информационную систему технологического контроля нефтяных скважин. Данная онтология была полезна как для описания требований безопасности к исследуемой ИИС, так и для разработки функционирующей в ней СОВ.

В ходе проведенных работ по исследованию предметной области ОК для интеграции постулированных там принципов в процесс построения защищенной ИИС технологического контроля нефтяных скважин, были получены следующие результаты:

методы и принципы, определенные в стандарте ОК [1] и разработанные для интеграции и оценки требований безопасности ИТ, были успешно применены при разработке измерительной информационной системы контроля производительности нефтяных скважин;

для представления требований безопасности, описанных в ОК, была разработана онтологическая модель, результатом работы которой является набор программных интерфейсов, которые должны быть реализованы (наполнены) пользователями в соответствии с действующей в организации политикой безопасности;

для построения программной реализации структуры требований безопасности, в соответствии с определенной в ОК вертикальной иерархией, был разработан специальный набор макросов, позволяющий также управлять реализуемыми функциями безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408–1–2002. Критерии оценки безопасности информационных технологий. –Введение и общая модель. 2002–04–04.–М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.–35 с.

2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408–2–2002. Критерии оценки безопасности информационных технологий. –Функциональные требования безопасности. 2002–04–04.–М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.–181 с.

3. **Гаврилова, Т.А.** Модели и методы формирования онтологий [Текст]/Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, В.А. Горовой//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2006.–№ 4.–С. 21–28.

4. **Рассел, С.** Искусственный интеллект. Современный подход: 2-е изд. [Текст]/С. Рассел, П. Норвиг; Пер. с англ.–М.: Изд. Дом «Вильямс», 2006. –С. 440–466.

Электроника, технологии производства материалов электронной техники

УДК 319.178:245

Л.М. Журавлева

ИЗОТОПТРОНИКА КАК НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Внедрение нанотехнологий наряду с информационными технологиями является необходимым условием научно-технического прогресса. Развитие нанотехнологий и информационных технологий взаимосвязано и обусловлено общими целями повышения качества жизни, перевода экономики на ресурсосберегающие производства, усиления национальной безопасности.

Последние достижения в области наноэлектроники и ядерных технологий позволили сформулировать новое научное направление – изотоптроника. Изотоптроника изучает влияние свойств ядер изотопов химических элементов на электронные характеристики структур, которые могут иметь размеры меньше 1 нм. Изотоптронику можно было бы назвать субнаноэлектроникой, подразумевая при этом область исследований свойств различных материалов, имеющих размеры, соизмеримые с величиной постоянной кристаллической решетки [1]. Название «изотоптроника» состоит из двух слов: «изотопы», обозначающие атомы одного и того же вещества с ядрами, состоящими из одинакового числа протонов и разного числа нейтронов, и «троника» от слова «трогать», т. е. использовать различные свойства вещества, обусловленные разным содержанием нейтронов в ядрах атомов [1, 2, 5].

Цель научных исследований изотоптроники – поиск новых материалов, базирующихся на особенностях изотопического строения вещества, для создания более совершенных устройств передачи, хранения и обработки информации в различных отраслях науки и техники. Основополагающей технологией изотоптроники является ядерная технология. Так, с помощью нейтронного облучения заготовок из изотопически-смешанных веществ можно изменять изотопический состав химических элементов, получать материалы с новыми электронными и оптическими свойствами и создавать на их основе совершенные оптоэлектронные приборы.

Из множества возможных приложений изотоптроники самым востребованным в настоящее время является применение новых материалов в волоконно-оптических системах передачи информации (ВОСП).

Это наиболее перспективные системы связи для передачи дискретной информации особенно на магистральных направлениях. Главная причина заключается в огромных ресурсах оптических волокон, которые позволяют передавать сигналы в полосе частот в десятки терагерц. Для реализации этих возможностей требуется соответствующая приемо-передающая аппаратура (кодеки и модемы). Элементной базой для них являются высокочастотные транзисторы, диоды, лазеры и фотодетекторы. Поэтому одно из направлений повышения пропускной способности волоконно-оптических линий связи – создание с помощью изотоптроники новых электронных и оптоэлектронных приборов.

Последние научные разработки свидетельствуют об огромном прорыве в области электронных и оптоэлектронных устройств. Так, например, уже существующие электронные приборы обладают высоким быстродействием и имеют максимальную рабочую частоту порядка 1 ТГц [2]. Дальнейшее повышение граничной частоты возможно лишь с переходом на низкоразмерные гетероструктуры и принципиально новую технологию изготовления электронных приборов. Низкоразмерные или квантовые структуры – это такие, у которых один (квантовые ямы, рис.1 *а*), два (квантовая проволока, рис.1 *б*) или все три разме-

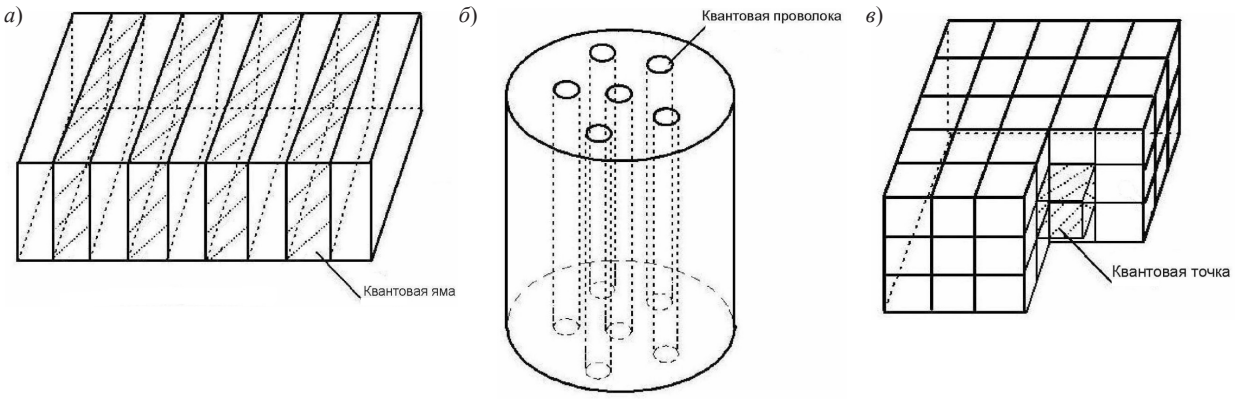


Рис. 1. Структуры:
а – квантовая яма; *б* – квантовая проволока; *в* – квантовая точка

ра (квантовые точки, рис.1 *в*) соизмеримы с длиной волны де Бройля электрона в твердом теле. В таких структурах наблюдается высокая подвижность электронов, которая является следствием локализации носителей заряда за счет потенциальных барьеров гетеропереходов (сопряжения двух полупроводников с разными электронными характеристиками) и квантования электронных состояний.

Особое значение для создания высокоскоростной элементной базы ВОСП имеют совершенство контактных поверхностей гетероперехода и чистота материала. Поэтому от качества изготовления стыкуемых слоев (отсутствия посторонних примесей, флуктуаций размеров квантовой структуры, «шероховатостей», которые равносильны внутренним дефектам) зависят характеристики эффективности электронных и оптоэлектронных приборов.

Получить качественные приборы для ВОСП в промышленных масштабах пока мешают определенные технологические трудности [2], которые можно было бы решить с помощью изотопотроники.

Известно, что материалы, состоящие из различных изотопов одного и того же химического элемента, обладают разными электронными и оптоэлектронными характеристиками (значениями запрещенной зоны, показателями преломления света, величиной спина, диэлектрической проницаемостью) [3]. Этот факт можно использовать для создания низкоразмерных гетероструктур из одного материала, легированного собственными изотопами.

Так, с помощью ядерных технологий путем нейтронного облучения определенных слоев заготовки (рис. 2), например, из кремния с естественным содержанием изотопов можно сформировать фотонные кристаллы и низкоразмерные структуры для оптоэлектронных приборов. Изображенные на рис. 1 структуры можно создать из более тяжелых изотопов кремния (Si^{29}, Si^{30}) путем облучения нейтронами изотопа Si^{28} [4]. Потенциальные барьеры таких «гетеропереходов» при этом оказываются достаточными, чтобы возбудить в таких структурах, например, экситоны.

В случае фотонно-кристаллического волокна (рис.1 *б*) требуемые различия в показателях преломления света n в отдельных элементах ФКВ (основе волокна и квантовых проволоках оболочки) можно достичь, если в результате облучения нейтронами заготовки создать слои из диоксида кремния с разной концентрацией тяжелых изотопов Si^{29}, Si^{30} [4], определяющей оптоэлектронные характеристики облученных слоев. Для производства твердотельного ФКВ можно облучать нейтронами заготовку из стекла до образования изотопа Si^{31}. Этот изотоп распадается до фосфора, небольшая концентрация которого значительно повышает разницу в коэффициентах преломления света сердцевины и основы волокна.

Для этого один или два размера облучаемого нейтронами пятна должны иметь порядок нескольких нанометров. В результате облучения, например, торцевой части заготовки будут образовываться горизонтальные или вертикальные (или одновременно и те, и другие) полоски с повышенным содержанием тяжелых изотопов, разделенные между собой необлученными слоями с естественной концентрацией изотопов (рис. 2). В зависимости от размеров облучателей и их расположения можно формировать в заготовке любые квантовые структуры.

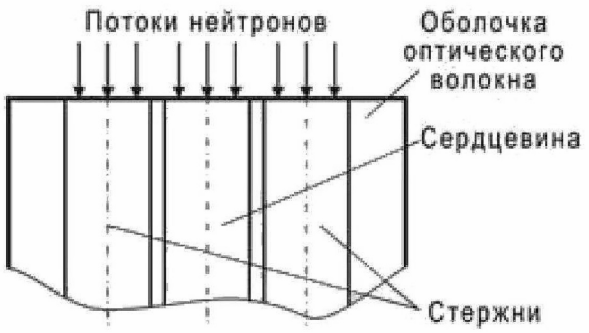


Рис. 2. Схема облучения оптического волокна

Таким образом, благодаря использованию изотопических свойств материалов и ядерных технологий можно предложить новый способ изготовления наноструктур с помощью нейтронного облучения. При этом отлаженные на протяжении нескольких десятков лет технологии нейтронного облучения в промышленном масштабе могут гарантировать высокую точность изготовления размеров оптоэлектронных приборов и чистоту материалов.

Наибольший практический интерес для облучения полупроводниковых материалов (Si, Ge, GasAs и т. д.) представляют собой тепловые нейтроны с энергией E в диапазоне от 0,025 до 1 эВ [5].

Тепловые нейтроны H вступают в реакцию поглощения с ядрами мишени X по следующей схеме [5]:

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}H \rightarrow {}^{A+1}_{Z}X + \gamma , \qquad (1) $$

где Z – атомный номер вещества; A – массовое число; γ – излучение, которое уносит основную часть освободившейся энергии.

Концентрацию изотопов кремния, например, можно подсчитать следующим образом [5]:

$$ N_i^1 = N_i \sigma_i \varphi t , \qquad (2) $$

где N_i^1 – выход i-го изотопа после облучения; N_i – концентрация i-го изотопа до облучения; σ_i – сечение реакции поглощения i-го изотопа; t – время облучения.

Применительно к изотопам кремния выход ^{29}Si из изотопа ^{28}Si в результате ядерной реакции может составлять $N_i^1 = 10^{-3} N_i$, где $N_i = 0{,}9218$ – концентрация изотопа ^{28}Si в естественном состоянии кремния.

После подстановки в формулу (2) получим величину интегрального облучения φt:

$$ \varphi t = 10^{-3} / \sigma_i , \qquad (3) $$

где

$$ \sigma_i = 0{,}08 / \sqrt{E} . \qquad (4) $$

Для E = 0,025 эВ в случае кремния имеем $\sigma_i = 0{,}506$ б (10^{-24} см^2), $\varphi t = 20 \times 10^{20}$ н/см^2.

При среднем значении интенсивности потока нейтронов $\varphi = 10^{17}$ н/см^2 с время облучения составит 5,56 ч.

С помощью формулы Лоренц–Лоренца [4] можно рассчитать относительный коэффициент преломления Δn облученной и необлученной областей заготовки. Так, увеличение концентрации тяжелых изотопов в $10^{-3} N_i$ раз соответствует значению $\Delta n = 0{,}007$. Теоретически разница между показателями преломления сердцевины и оболочки волокна, необходимая для соблюдения эффекта полного внутреннего отражения, может быть сколь угодно малой. Практически все зависит от свойств лазера (угла расходимости лазерного излучения, который для различных лазеров колеблется от 0,1 до 6 градусов).

В случае изготовления изотопических «гетеропереходов» нейтронным облучением разница в запрещенных зонах стыкуемых слоев полупроводника, состоящих из разных изотопов, может составлять в зависимости от материала от десятых долей эВ (материалы с изотопами водорода, например, LiH и LiD) до десятых долей ТэВ (изотопы кремния). Перспектива использования изотопической структуры вещества для создания «гетеропереходов» объясняется, во-первых, тем, что изотопически-смешанный состав заготовки в результате облучения можно менять в широких пределах. Так, концентрацию того или иного тяжелого изотопа можно поднимать до 100 %. Во-вторых, свойства материалов сильно зависят от изотопического состава. Так, величина сечения поглощения нейтронов (2) для разных изотопов одного и того же химического элемента, например, кадмия, индия и др. могут отличаться на два порядка [4]. Это свидетельствует о больших возможностях моделирования новых материалов с помощью изотоптроники.

В случае использования кремния один слой квантовой ямы (см. рис. 2) будет иметь естественную концентрацию изотопов преимущественно Si^{28}, а в другом слое все изотопы Si^{28} будут переведены в результате облучения нейтронами в Si^{29}. Конкретная величина потенциального барьера в образованном «гетеропереходе» ΔE зависит от размеров ядер изотопов и величин кулоновских

взаимодействий внутри атома. Известно [3], что наибольшей разницей запрещенных зон ΔE для кремния обладают, например, изотопы Si^{28} и Si^{29}. Эта разница видна из модели кулоновского взаимодействия, где сила, препятствующая отрыву валентного электрона в зону проводимости, обратно пропорциональна расстоянию (радиусу ядра). Более тяжелый изотоп Si^{29}, имеет ядро с числом нейтронов на один больше, чем у изотопа Si^{28}. Поэтому радиус ядра у Si^{29} больше, а величина запрещенной зоны меньше, чем у Si^{28}. Существуют и другие причины, изложенные в [3]. Следует отметить, что дальнейшее утяжеление ядра кремния приводит к сжатию ядра и уменьшению радиуса [3]. Так, для кремния наибольшая разница ΔE составляет 0,1 ТэВ. Согласно теории прямоугольных потенциальных ям конечной глубины можно утверждать, что независимо от величины потенциального барьера в яме будет существовать хотя бы одно связанное состояние частицы, например, экситона. Причем энергия связи такой частицы увеличивается обратно пропорционально ширине ямы [2]. Этот факт позволяет считать, что изотопические квантовые структуры, полученные с помощью ядерных реакций, можно использовать для возбуждения электронов и создавать на их основе электронные и оптоэлектронные приборы. Такие устройства будут обладать всеми характеристиками наноструктур. Кроме того, они будут отличаться высокой чистотой и однородностью материала за счет того, что легирование осуществляется не «чужеродным» элементом, а собственным изотопом, имеющим близкие значения постоянной кристаллической решетки.

Для изготовления с помощью ядерных технологий изотопических низкоразмерных структур необходимо обеспечить определенные параметры облучения. Это такие характеристики, как сфокусированность нейтронного потока, дифракционные искажения, степень разрешения (однородности) нейтронов по энергии $\Delta E_н$ и т. д. Наибольшее значение для достижения высокой точности изготовления геометрических размеров и отсутствия дефектов имеет величина $\Delta E_н$. Ее влияние, например, на точность размеров можно оценить по длине поглощения нейтронов L. Величина L равна:

$$L = \frac{1}{K \cdot \sigma_i}, \qquad (5)$$

где $K = 5{,}04 \times 10^{22}$ ат/см^3 – число атомов кремния в 1 см^3.

Используя формулы (4) и (5), можно рассчитать разницу ΔL для величин энергий $E \pm \Delta E_н$. Так, современные монохроматоры могут иметь разрешение по энергии нейтронов $\Delta E_н = 10^{-9}$ эВ. После подстановки в соответствующие формулы получим, что величина ΔL, определяющая точность изготовления геометрических размеров низкоразмерных структур с помощью нейтронного облучения, составит значение порядка ± 5 нм.

Наиболее интересным механизмом реализации оптоэлектронных приборов на низкоразмерных стуктурах можно считать экситонный [2].

Рассмотрим возбуждение экситонов в таких структурах применительно к изотопической квантовой яме.

Экситонами называют электрон-дырочные пары, в которых электрон и дырка соединены кулоновскими силами притяжения (рис. 3). Такая частица возникает в результате поглощения фотона, не влияет на электропроводность вещества, поскольку не обладает электрическим зарядом. Возникновение экситонов значительно облегчается в низкоразмерных структурах (наблюдается даже при комнатной температуре), т. к. локализация в ограниченной области усиливает эффекты перекрытия волновых функций электронов и дырок. В случае, когда боровской радиус r экситона намного меньше ширины квантовой ямы, экситон сжимается, усиливаются кулоновские силы. Это приводит к увеличению энергии связи $A_{св}$ между электроном и дыркой, что сказывается на устойчивости экситонов в квантовых ямах по отношению к сильным электрическим полям.

Экситоны могут быть описаны в рамках водородоподобной модели, где энергии связанных со-

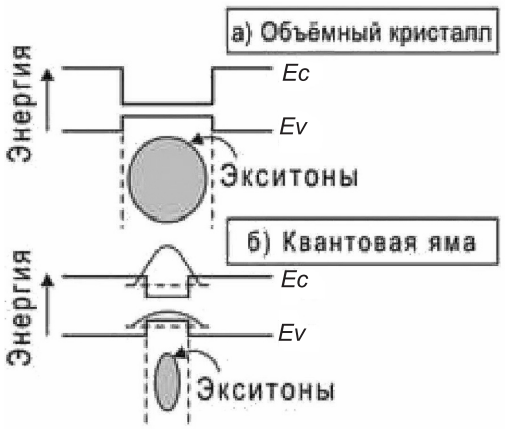


Рис. 3. Орбиты экситонов

стояний $E_{экс}$ определяются известным уравнением Шредингера [2]. Так, для кремния энергия экситона (равная энергии фотона, необходимой для его создания) и его радиус будут составлять соответственно на нижнем уровне квантования 12,1 ТэВ и 3,13 нм. Величина $E_{св}$ для объемного материала равна разнице между величиной запрещенной зоны E_c и $E_{экс}$. Экситоны гораздо легче и чаще наблюдаются в собственных полупроводниках, чем в легированных другими элементами, поскольку в последних свободные носители частично экранируют кулоновское взаимодействие между электроном и дыркой. Поэтому вероятность возбуждения экситонов в изотопических структурах, легированных собственными изотопами, должна быть выше. В очень многих полупроводниках рекомбинация электронов и дырок происходит без излучения фотона. Процесс рекомбинации осуществляется посредством центров рекомбинации в виде внутренних дефектов. Более чистые изотопические материалы могут повысить эффективность фотолюминесценции, что важно, например, для лазерных диодов.

Важной характеристикой экситона является стабильность, которая определяет время «жизни» частицы. От нее зависят многие параметры оптоэлектронных приборов (оптических модуляторов, устройств хранения информации и т. д.). Во многом стабильность экситона определяется величиной энергии связи. Значение $E_{св}$, в свою очередь, зависит от глубины квантовой ямы, ширины ямы a и подвижности частиц (электрона и дырки) в полупроводнике.

Для моделирования оптоэлектронных устройств с заданными параметрами необходимо иметь методику расчета $E_{св}$ экситонов в зависимости от характеристик квантовых структур (сочетания изотопов химического элемента, ширины ямы a, разницы между величинами запрещенных зон ΔE, зависимости величин потенциальных барьеров ямы для электрона $V_э$ и дырки и $V_д$ от ΔE). Такая методика позволит аналитическим путем находить характеристики ямы, которые могли бы обеспечить максимально возможную величину $E_{св}$. Так, на основании работы [6] можно предложить следующий алгоритм нахождения энергии связи экситона:

1) определение разницы в величинах запрещенных зон E_c между слоями в «гетеропереходах», образующих квантовую яму (см. рис. 3) $\Delta E = E_{c_1} - E_{c_2}$;

2) вычисление высоты барьера для электрона $V_э$ и дырки $V_д$ (их значения зависят от конкретных материалов, например, для сочетания GaAs – AlGaAs $V_э = 0{,}85\Delta E$, $V_д = 0{,}15\Delta E$);

3) подстановка их в известное уравнение Шредингера применительно к потенциальной яме ограниченной высоты для расчета волновых функций электрона $\psi_э(z)$ и дырки $\psi_д(z)$;

4) после решения численным методом урав-

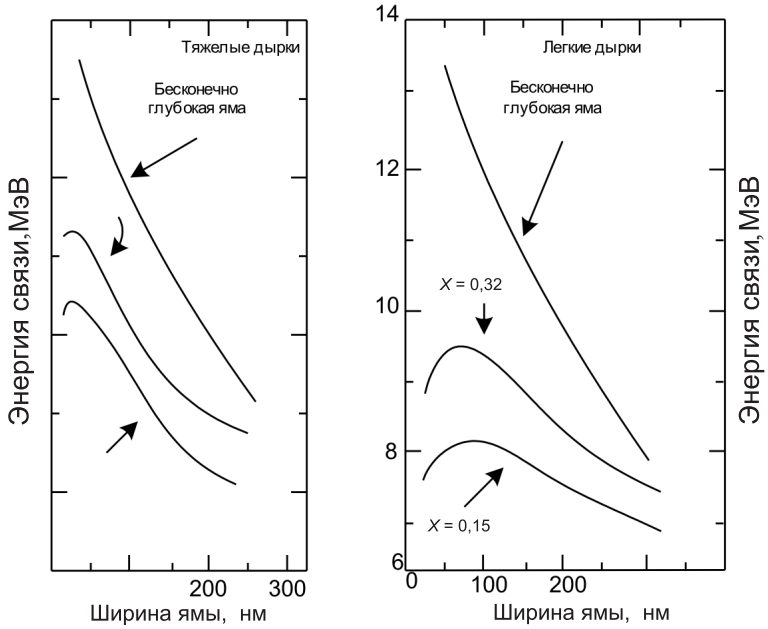


Рис. 4. Зависимость энергии связи от ширины ямы

нений для волновых функций $\psi_э(z)$ и $\psi_д(z)$ расчет значений энергий низшего уровня для электрона $E_э$ и дырки $E_д$;

5) нахождение энергии связи как разности между энергией электрон-дырочной пары и энергией экситона $E_{экс}$, $E_{св} = (E_э + E_д) - E_{экс}$;

6) построение зависимости $E_{св} = f(a)$;

7) определение величины a, соответствующей максимальному значению функции, т. е. max $E_{св}$.

В качестве примера на рис. 4 изображены зависимости энергии связи от ширины ямы a для сочетания полупроводников $Al_xGa_{1-x}As$ – GaAs [6].

Вид этих кривых свидетельствует о том, что зависимости $E_{св} = f(a)$ имеют явный нелинейный характер с максимумом в области 3–4 нм. При дальнейшем уменьшении ширины ямы энергия $E_{св}$ падает за счет эффекта туннелирования. Выбор конкретного материала для квантовой структуры зависит от требуемых характеристик экситона. В этом случае предпочтение следует отдавать прямозонным полупроводникам, таким, как галлий арсенид. Несмотря на небольшую разницу в величинах запрещенных зон для изотопов кремния, этот химический элемент может быть использован для создания низкоразмерных структур, например, фотонно-кристаллического волокна, где важно обеспечить необходимую разницу в коэффициентах преломления основы ФКВ и квантовых проволок.

Дальнейшее развитие изотоптроники позволит расширить список перспективных материалов для наноэлектроники и оптоэлектроники и продвинет создание элементной базы не только для телекоммуникационных систем связи, но и для других стратегически важных направлений науки и техники, например, квантовых процессоров и систем передачи квантовой информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Журавлева, Л.М.** Ядерная нанотехнология низкоразмерных изотопически-смешанных структур [Текст]/Л.М. Журавлева, В.Г. Плеханов//Наноиндустрия.–№ 4.–2009.–С. 28–30.

2. **Мартинес-Дуарт, Дж. М.** Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники [Текст]/Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р. Дж. Мартин-Палма [и др.].–М.: Техносфера, 2007.–368 с.

3. **Tsoi, S.** Nanotechnologies for microelectronics [Текст]/S. Tsoi, H. Alawadhi, X. Lee// Physical Review. –2004.–Vol. 70.–P. 193–201

4. **Журавлева, Л.М., В.Г. Плеханов** Способ изготовления оптического волокна: патент РФ №2302381 от 09.12.2005.

5. **Мухин, К.Н.** Экспериментальная ядерная физика [Текст].–СПб.–М.–Краснодар: Лань, 2008.–318с.

6. **Greene, Ronald L.** Energy levels of Wannier excitons in GaAs-Ga_{1-x} Al_x As quantum-well structures [Текст]/Ronald L. Greene//Physical Review. –Vol. 29.–№ 4.

УДК 004. 658: 025. 347

Е.В. Стрелкова

ИДЕНТИФИКАЦИЯ АВТОРОВ И ПЕРСОНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ В ЭЛЕКТРОННО-БИБЛИОТЕЧНЫХ СИСТЕМАХ

Электронные ресурсы библиотек, интегрированные системой лингвистического обеспечения и сервисами телекоммуникационных каналов связи, служат для специалистов отрасли средством предоставления услуг и выпуска библиотечной продукции. Основу этой деятельности составляет работа по ведению двух типов электронных каталогов. В первом случае обеспечивается поиск информации о содержании библиотечных фондов и условиях доступа к единицам хранения, во втором – каталоги дают возможность перехода (по результатам успешного поиска) от библиографической записи (БЗ) к содержанию источника: каталоги для поиска, или каталоги для поиска и управления доступом.

Дополнительно настройками пользовательского интерфейса и качеством записей определяется круг фактографической, адресной и справочной информации, предоставляемой читателю в автоматизированном режиме.

Основанием для достоверности и актуальности библиографической информации служит авторитетная работа, по ее результатам формируются авторитетные данные – часть справочного аппарата лингвистического обеспечения. Их объединяет использование:

кодированной информации (в системе форматов машиночитаемой каталогизации);

общероссийских справочных ресурсов;

системы авторитетных/нормативных файлов (национальных, отраслевых, локальных).

Авторитетный файл – совокупность авторитетных, ссылочных и справочных записей, в которых представлена необходимая информация о точках доступа библиографической записи.

В модели функциональных требований к библиографическим записям (FRBR – Functional Requirements for Bibliographic Records) и авторитетным данным (FRAD – Functional Requirements for Authority Data) лицо, род и организация составляют вторую, а концепция, предмет, событие и место – третью группу объектов по отношению к произведению (его выражению, воплощению, физической единице или экземпляру). Любой из этих объектов может иметь предметные связи с произведением. В единой электронной среде нормализованные формы имен индивидуальных авторов, персоналий, имен коллективных авторов, унифицированных заглавий, географических названий, тематических предметных рубрик и связанные с ними даты, события, факты становятся частью современной системы справочно-

Барков, Владимир Александрович (1939-2001)

Источники:

1. НТВ СПбГПУ. 1996. №1(3).
2. СПбГПУ. Биографии. СПб. : Гуманистика, 2006.
3. Профессора СПбГТУ. В 2-х ч. СПб., 1999.

Фундаментальная библиотека Санкт-Петербургского государственного политехнического университета 10.09.2009

Рис. 1. Пример вывода авторитетных данных локального авторитетного файла ФБ СПбГПУ

библиографического обслуживания [1], вписываются в концепцию международных принципов машиночитаемой каталогизации.

Вместе с тем полнотекстовые электронные ресурсы, не обеспеченные системой каталогизации, предоставляют пользователям за счет применения сетевых технологий эффективные сервисы поиска и доступа к источникам различной природы: электронным копиям произведений литературы, искусства, науки. Библиотеки все чаще включают такие ресурсы в структуру своих фондов и одновременно создают собственные электронные коллекции, архивы, библиотеки – участвуют в инновационной деятельности, связанной с информатизацией общества в целом.

В Концепции инновационной политики Российской Федерации на 1998–2000 гг. инновация (нововведение) определена как «конечный результат инновационной деятельности, получивший реализацию в виде нового или усовершенствованного продукта, реализуемого на рынке, нового или усовершенствованного технологического процесса, используемого в практической деятельности» [2]. Направления развития сетевого пространства позволяют ставить задачи распознавания образов, делают возможным поиск данных и получение информации, например, за счет универсальных идентификаторов ресурсов (URI – Uniform Resource Identifier), системы описания ресурсов RDF (Resource Description Framework), механизмов логического вывода для неполных данных.

Для библиотечной сети инновационные задачи во многом связаны с объективной оценкой конкурентоспособности предоставляемых пользователям сервисов при соблюдении традиции организационной культуры отдельно взятой библиотеки и в соответствии с ее долгосрочными планами работы. К ним относится и стратегия взаимоиспользования ресурсов локального, отраслевого, корпоративного, национального уровня при создании и ведении авторитетных файлов (АФ).

Авторитетный контроль в ходе машиночитаемой каталогизации сочетается с задачами предоставления информации целевым группам пользователей. Физическое лицо одновременно может выступать в роли создателя произведения, тогда библиотека заинтересована в получении данных об авторе, раскрывающих весь круг его публикаций, и быть пользователем разнообразных информационных систем, которые все в большей степени нуждаются в получении и обработке подробных сведений о личности пользователя, его профессиональных интересах, социальной принадлежности, устоявшихся предпочтениях. Библиотеки осваивают технологии Web 2.0, не снимая с себя обязательств легитимного раскрытия информации о читателях и авторах произведений и используя методики персонификации пользовательского интерфейса в целях адресного предоставления информационно-библиографических услуг. Создание для пользователя виртуального «Личного кабинета», «Личной папки» стало технологической нормой современных библиотечных сервисов.

Проектная деятельность по внедрению технологий Web 2.0 сделала рядовой процедуру авторизации пользователей при обращении к сетевым ресурсам. Защита информации личного характера от несанкционированного распространения согласно законодательным нормам, в первую очередь – закона «О персональных данных», должна обеспечиваться при обработке персональных данных держателями баз данных, но также зависит и от уровня информационной, правовой культуры самих пользователей [3, 4].

На практике этот подход пока воспринимается как ужесточение формализации предоставления услуг. Например, нельзя сообщать читателю сведения о другом пользователе на основе служебной базы данных, даже в случае, когда эта информация поможет ускорить возврат и последующую выдачу искомой книги. Или без подготовки и утверждения локальных нормативных актов, регламентирующих использование данных персонального характера, недопустимо раскрытие данных о читателе в целях его идентификации при выявлении круга авторов произведений, отнесенных к объектам интеллектуальной собственности организации. Внедрение такой тактики взаимодействия с пользователями делает универсальным алгоритм предоставления услуг как по схеме взаимодействия «человек – машина», так и при совместной работе машин без участия человека.

Предоставление сведений персонального характера в проектах, связанных с «Библиотекой 2.0», имеет несколько другую нагрузку, т. к. позволяет читателю стать участником, например, нормализации данных в библиотечных сетях. С 2005 г. немецкий раздел Wikipedia совместно

с библиотечными специалистами, создающими PND (Personennamendatei), организовал проект «Немецкие объединенные нормативные файлы личных имен». Примерно 20 % из 600 тыс. статей на немецком языке составляли тогда статьи о персоналиях. Очевидно, что метаданные этих статей и авторитетного файла личных имен Немецкой национальной библиотеки (DNB – Deutsche Nationalbibliothek) возможно было сопоставить с целью установления совпадений: **имя, альтернативные имена, дата, место рождения и смерти, описание персоны**. Программный инструментарий, созданный при участии разработчиков из среды пользователей, позволил делать в библиотечном каталоге поиск метаданных, а на следующем шаге выполнять сверку метаданных PND и Wikipedia. Пользователь сети решал, является ли результат соответствием и следует ли добавить идентификатор и номер записи PND к статье. С помощью шаблона была создана ссылка от статьи к каталогу DNB. После этого можно выполнять поиск с учетом нормализованных записей: пользователи энциклопедии становятся пользователями и библиотечного ресурса. За две недели силами пользователей Wikipedia более 22 тыс. статей было связано с авторитетными данными PND.

В практике ведения каталогов, создаваемых средствами АБИС «Руслан», прием по визуализации полей авторитетных записей (АЗ), применяется с 2000 г. Вместе с появлением страниц справочных сетевых ресурсов, созданных библиотечными специалистами, выполняется сопоставление метаданных авторитетных записей и полнотекстовых материалов. Например, в Ленинградской областной детской библиотеке среди источников авторитетных данных указывается ссылка на именной раздел автора на Региональном сайте детских библиотек [5]. Фундаментальная библиотека Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (ФБ СПбГПУ) связывает авторитетную запись со страницами сетевого справочника «Политех в лицах» [6].

В практике ведения Регионального сайта детских библиотек сведения об авторах дополняются и актуализируются в сотрудничестве с авторами или официальными представителями их интересов. Справочное издание «Политех в лицах» обновляется на основе выгрузки из библиографических, авторитетных и полнотекстовых баз данных ФБ СПбГПУ. Обратная связь для участия пользователей в развитии этих ресурсов обеспечивалась режимом переписки по электронной почте, но сейчас может быть переведена на wiki-технологию, т. к. есть предпосылки реализации такого сотрудничества библиотекарей и пользователей при устоявшихся навыках работы в сетевой среде.

Одной из причин раскрытия сведений об авторах в библиотеках, отражающих результаты научных исследований, стала оценка цитируемости авторов и участие в проекте Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), «ориентированного на продвижение в сети Интернет российских научных изданий, разработку инструментариев и сервисов для аналитики, науко- и библиометрических исследований и измерений научной деятельности» [7].

Фундаментальная библиотека СПбГПУ, участвуя в проекте РИНЦ, расширила с лета 2009 г. спектр создаваемых авторитетных записей. Для создания авторитетного файла имен индивидуального автора ведется контрольный массив записей об авторах журнала «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (НТВ), издаваемого с 1995 г. Назначение массива нормативных записей во многом ориентировано на выявление авторов, сведения о которых не отражены в предметных рубриках, связанных с персоналиями. Особенность круга авторов НТВ – наличие публикаций

200#1$aГагарин$bА.Г.$f1855-1920$gАндрей Григорьевич$cкнязь
300##$aРусский ученый и инженер. В 1900-1907 гг. – директор Петербургского политехнического института.
810##$aБСЭ 3-е изд. Т.5, с.623.
810##$aСанкт-Петербургский государственный политехнический университет в XX – начале XXI века: исторические очерки о его руководителях. СПб., 2005, с.11-51.
810##$aДиректора-ректоры Политехнического
<URL:http://pvl.unilib.neva.ru/dr/6.html>$bПортрет

Рис. 2. Фрагмент содержания авторитетной записи ФБ СПбГПУ

в Электронной библиотеке ФБ СПбГПУ (ЭБ ФБ СПбГПУ) и отсутствие печатной версии этих материалов, что делает необходимым поиск информации об авторах ЭБ ФБ СПбГПУ в источниках, представленных на сепаратных носителях. Записи в каталоге ЭБ ФБ СПбГПУ формируются в единой методике машиночитаемой каталогизации, принятой в библиотеке при использовании АБИС «Руслан». Каталог удаленного доступа (ОРАС – Online Public Access Catalog) ФБ СПбГПУ относится к каталогам первого типа, ОРАС ЭБ ФБ СПбГПУ по результатам поиска предоставляет информацию об условиях доступа к полнотекстовому источнику (доступ пользователей локальной сети библиотеки, сети вуза или сети Интернета) и разрешенных видах использования объекта хранения ЭБ ФБ СПбГПУ. Выпуски НТВ приняты в качестве отправной точки для создания авторитетной записи и сопоставления имен, как авторитетный и репрезентативный печатный источник сведений об авторах и авторских коллективах, опубликовавших результаты своих исследований.

Для выпусков НТВ 2009 г. в базах ЭК ФБ СПбГПУ обеспечены полный охват аналитической росписи статей и нормализация полей 7__ блока БЗ в формате RUSMARC (первичная, альтернативная или вторичная интеллектуальная ответственность за интеллектуальное или художественное содержание произведения: 700, 701 и 702 поля соответственно). Для авторитетных записей введен маркер «автор_СПбГПУ», разработан критерий и правила его установки. В электронной форме подготовлена Инструкция по созданию и редактированию авторитетных/нормативных записей для индивидуальных имен автора (в части записей х-типа). Содержание инструкции дополняется вместе с практикой применения методики Российской национальной библиотеки (РНБ) и опубликованных результатов проекта по созданию Виртуального международного авторитетного файла имен (VIAF – Virtual International Authority File) [8].

Проект VIAF имеет 4 ступени:

1. Соединение существующих записей.

2. Создание сервера – Поиск и получение информации.

3. Продолжающаяся поддержка – (Open Archive Initiative – Harvesting) в отношении открытой архивной информации.

4. Заявки конечного пользователя – Предоставление информации.

На сайте проекта, создаваемого с 2003 г., на текущем отрезке времени представлены библиотеки-партнеры VIAF. Многие из них используют международные форматы серии MARC21 и представляют тезаурусы в форме авторитетных/нормативных файлов. Масштабы работ к концу 2005 г., когда участниками VIAF были только Библиотека Конгресса (LC – Library of Congress) и Национальная немецкая библиотека (DDB – Die Deutsche Bibliothek) совместно с Объединением библиотек Баварии (BVB – Bibliotheksverbund Bayern), характеризуют цифры. Америка для сопоставления пар имен в автоматизированном режиме предоставляла 4,2 млн АЗ и 9,3 млн БЗ, Германия – 2,6 млн АЗ DDB и 15 млн БЗ (DDB совместно BVB). Среди первоначальных целей проекта предусматривалось решение таких универсальных для всех каталогизирующих организаций задач, как сопоставление пар имен с различной графикой написания: «расщепление» одинаковых форм имени для разных авторов, слияние разных форм имен одного автора, поиск алгоритмов для сравнения записей [9].

В практике работы ФБ СПбГПУ на массиве в 3912 авторитетных записей в формате RUSMARC фамилия «Иванов» встречается 36 раз в 56-ти нормализованных по 7__ блоку БЗ.

Для идентификации авторов и раскрытия сведений о них используются только открытые источники или сведения регистрационных листов Лицензионных договоров на право использования произведения при передаче электронных докумен-

Иванов
Вадим Михайлович
Владимир Михайлович
Владимир Михайлович 1956-
В.Н.
Владимир Николаевич 1956-
Виктор Павлович
Владимир Петрович
Вячеслав Петрович
Дмитрий Владимирович [1]
Дмитрий Владимирович [2]
К.М.
Константин Михайлович 1963-
С.В.
Сергей Викторович
Сергей Владимирович

Рис. 3. Часть списка однофамильцев в массиве авторов НТВ в ФБ СПбГПУ

Таблица 1

Авторитетные данные на сайте РНБ

Dewar T.	Дюар Т.
Dewar T. (1864-1930) 001: RU\NLR\AUTH\7788618 200: 1$8eng$7ba$aDewar$bT.$f1864-1930$gTommy 300: 0 $aАнглийский предприниматель, производитель виски. 400: 1$8eng$7ba$aDewar$bT. R.$f1864-1930$gThomas Robert$5z 700: 1$5z$8rus$7ca$aДюар$bT.$f1864-1930$gТомми	Дюар Т. (1864-1930) 001: RU\NLR\AUTH\7788617 200: 1$8rus$7ca$aДюар$bT.$f1864-1930$gТомми 300: 0 $aАнглийский предприниматель, производитель виски. 400: 1$8rus$7ca$aДюар$bT. P.$f1864-1930$gТомас Роберт$5z 700: 1$8rus$7ca$aДьюар$bT. P.$f1864-1930$gТомас Роберт$5z 700: 1$5z$8eng$7ba$aDewar$bT.$f1864-1930$gTommy

тов в ЭБ ФБ СПбГПУ. Для АЗ имен индивидуального автора принято решение о «маске» или шаблоне, по которому сведения об авторе отражаются в полях, доступных пользователям электронно-библиотечных систем на правомерной основе.

Например, по письменному разрешению автора его год рождения вносится в 200 поле АЗ, что автоматически приводит к обнародованию этой информации для неограниченного числа пользователей и переводу в статус общедоступных персональных данных. По закону «О персональных данных» в общедоступные источники могут включаться: **фамилия, имя, отчество, год и место рождения, адрес, абонентский номер, сведения о профессии и иные персональные данные**, предоставленные субъектом персональных данных.

Сведения служебного характера, относящиеся к категории примечаний каталогизатора, недоступны внешним пользователям и защищены от несанкционированного доступа. Законом «О персональных данных» определено, что «**общедоступные персональные данные** – персональные данные, доступ неограниченного круга лиц к которым предоставлен с согласия субъекта персональных данных или на которые в соответствии с федеральными законами не распространяется требование соблюдения конфиденциальности» [3, 10].

В оценке эффективности научной деятельности организации индекс цитирования ее журналов и публикаций в целом сочетается с индексом цитируемости авторов публикаций. Первым шагом для получения этих данных необходимо определить, какой критерий следует применять, определяя принадлежность автора к организации. После установления соответствия имени индивидуального автора утвержденному критерию в записях авторитетного файла для каждого из принятых параллельных заголовков создается отдельная авторитетная/нормативная запись. В этих записях параллельные заголовки выполняют роль авторитетных заголовков, для которых при необходимости формируются ссылки в полях блоков 4__ и 5__, а также примечания в полях блока 3__. Записи, созданные для параллельных заголовков,

Таблица 2

Представление авторитетных данных в кириллице и латинице по системе А

Кириллица		Латиница	
А	а	A	a
В	в	V	v
Д	д	D	d
Е	е	E	e
Ё	ё	Ë	ë
И	и	I	i
І	і	Ì	ì
Л	л	L	l

Кириллица		Латиница	
М	м	M	m
О	о	O	o
П	п	P	p
Р	р	R	r
Т	т	T	t
Ф	ф	F	f
Х	х	H	h
Ч	ч	Č	č

Система А: Fëdorov, Mihail Petrovič

Система Б: Fedorov, Michail Petrovich

связываются между собой с помощью полей связи блока 7__.

Транслитерация кирилловского письма латинским алфавитом по ГОСТ 7.79-2000 (ISO 9) может выполняться по системе с использованием диакритики (система А) или по системе Б – за счет схемы с использованием буквосочетаний. В системе авторитетных записей национального уровня используется диакритика, в локальных авторитетных файлах более распространена система Б, т. к. она ориентирована на удобство набора имени автора в альтернативной графике.

Приведенный пример показывает, насколько существенным является вопрос о гармонизации форм авторитетных записей и оценке погрешности поиска информации об авторах, публикующих свои работы на иностранных языках.

Для авторов русскоязычных изданий из баз ЭК ФБ СПбГПУ по разработанной схеме выполняется выгрузка данных, определяется степень совпадений имен авторов статей НТВ при условии, что каждая из статей написана при участии хотя бы одного автора СПбГПУ.

НТВ за 2009 г. (НТВ-2009) – 24 выпуска, 998 записей.

Все авторы внесены в базу РИНЦ.

В АФ «Авторы» ФБ СПбГПУ (на 13.05.2010):

– 3693 записи на индивидуального автора;

– из них 1606 отмечены служебным маркером «автор_СПбГПУ».

355 статей из НТВ-2009 создано при участии 439 авторов СПбГПУ.

294 статьи опубликованы авторами СПбГПУ со статусом первичной интеллектуальной ответственности (первый или единственный автор статьи).

587 раз авторы СПбГПУ выступили в статусе соавторов в 355 статьях НТВ-2009.

Каждый из этих авторов может быть представлен в Электронной библиотеке ФБ СПбГПУ. Для установления связи АЗ с аналитической росписью статей и описанием полнотекстовых электронных ресурсов используются регистрационные листы служебных произведений и Лицензионных договоров на право использования произведений. Эти документы становятся источником вариантных форм имен индивидуального автора, т. к. печатные материалы обычно проходят предварительную редакционно-издательскую обработку, а электронные публикации в большей степени относятся к препринтам или не имеющим статуса издания сетевым документам.

К установлению связи форм имени приводят анализ списков литературы в текстах источников, имена соавторов и близкая тематика публикаций – основные приемы работы в проекте VIAF.

Этот метод, например, подтвердил раскрытие имени кандидата технических наук, а в настоящее время – академика РАН Васильева Юрия Сергеевича, президента СПбГПУ:

БЗ на автореферат была отредактирована после анализа массивов записей (Васильев Ю.С. – 435 БЗ), проводимого при подготовке к обновлению страниц сетевого справочного издания «Политех в лицах». Указанные в автореферате публикации автора уже были ранее нормализованы по 7__ блоку БЗ (Васильев Ю.С.&RU\SPSTU\sub\108303 – 240 БЗ) и стали основанием принятия решения об установлении связи БЗ на автореферат и АЗ на имя автора.

Через нормализацию библиографических баз данных формируются условия для построения

[200]$aАльаззех$bД.С.$gДжамиль Самех
[810]$aНТВ СПбГПУ. 2007. №4(52), т.2.$bаспирант каф. АВТ ФТК СПбГПУ (2007)
[200]$aАль-Аззих$bД.С.$gДжамиль Самих
[810]$aНТВ СПбГПУ. 2007. №2.$bаспирант, доц. каф. АВТ ФТК СПбГПУ (2007)

Рис. 4. Раскрытие вариантных форм имени в полях авторитетной записи

Васильев, Юрий Сергеевич. Методика технико-экономических расчетов параметров каналов гидроэлектростанций : автореф. дис. … канд. техн. наук / Ю. С. Васильев ; Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева. — Л., 1962. — 18, [1] с. : ил. — Библиогр.: с.19.

Рис. 5. Вывод библиографической записи в ЭК ФБ СПбГПУ, связанной с АЗ

схем поиска и извлечения информации без участия человека в среде Semantic Web. Для перспективы автоматизированного поиска информации за счет связывания словарей терминов с контентом, когда нормализованные данные библиографических баз отражаются в схеме «таксономия-словарь-тезаурус», методы ведения локальных авторитетных/нормативных файлов необходимо согласовать на отраслевом и корпоративном уровне взаимодействия, учитывая, что международная схема авторитетных/нормативных файлов не предполагает создания авторитетных файлов внутри корпораций.

Большое значение в идентификации авторов имеет графическая информация и фотоматериалы. Не всегда они помогают раскрыть инициалы, но, например, удостоверить, что автор действительно был аспирантом СПбГПУ в момент подготовки к конференции молодых ученых, может официальная публикация фотографии на странице университетского сайта. Фотографии и другие архивные материалы библиотечного хранения все чаще используются для оцифровки результатов краеведческих исследований. Иногда цифровая копия включается в ресурсы библиотеки, а оригинал документа остается у владельца. Также источниками идентификации сведений об авторе могут быть надписи и владельческие знаки на мемориальных объектах, комментарии к черновикам или рукописям, запись голоса автора, кино- и видеоматериалы. Часть этих источников традиционно описывается в каталогах библиотек, но все больше вопросов вызывает необходимость создания машиночитаемых записей на помещенные в электронные коллекции цифровые объекты, для оригиналов которых нет практики каталогизации.

Конвенция Совета Европы о защите личности в связи с автоматической обработкой персональных данных была принята 28.01.1981. Еще тогда было сформулировано, что «персональные данные» означают информацию, касающуюся конкретного или могущего быть идентифицированным лица («субъекта данных») [11]. В ракурсе правовых аспектов раскрытия содержания архивных материалов личного характера (в целях сохранения в цифровой форме источников для настоящей и будущей исследовательской деятельности) применимы такие документы, как заявление ИФЛА о доступе к информации, соотносимой с личностью и комментарии Пленума Верховного Суда, связанные с уточнением вопросов по введению в действие четвертой части Гражданского кодекса РФ [12, 13]. Оба документа касаются проблемы раскрытия сведений о личности, которые могут быть без ведома их владельца использованы в целях киберпреступлений, когда виртуальный образ может стать подменой действий реального физического лица. Ни при каких обстоятельствах библиотека не может допускать халатности по отношению к такой опасности, поэтому все действия по оцифровке источников и результатов краеведческих исследований должны быть обеспечены нормативно-методическими документами и локальными правовыми актами.

Как и в проекте сопоставления имен PND и статей Wikipedia, проект VIAF использует в качестве категорий точек совпадений персональные данные. К сильной категории отнесены имя автора и даты жизни. Информация о годе рождения – к средней категории. Погрешность в 1 год считается допустимой. Дополнительная информация о форме имени вносится соответственно в поле 670 MARC21 (VIAF) и 810 RUSMARC (РНБ).

В практике создания авторитетных записей о персоналиях ФБ СПбГПУ опирается на правило, по которому АЗ создаются на основании каталогизируемых источников: при наличии публикации о персоне, поступившей в фонд библиотеки. Пропорция АЗ в файле «Рубрики» аналогична приведенной статистке Wikipedia: из 16-ти тыс. использованных в ЭК ФБ СПбГПУ предметных рубрик к персоналиям относятся четыре тыс. (3981/16397 – 24 %). Особенность АЗ на имена авторов проявляется в необходимости мониторинга сведений об авторе для актуализации авторитетных данных и снижения дублирования записей. Записи о персоналиях-авторах не требуют такого оперативного обновления, как в отношении авторов, не представленных в справочных и энциклопедических изданиях: молодых авторов, создателей малоформатных и малотиражных произведений. Доля пересечений АЗ из файла «Авторы» и персоналий из файла «Рубрики» составляет десятки записей (3693&3981=31). В ФБ СПбГПУ ведется электронный справочник «Персоналии_СПбГПУ», записи которого создаются с использованием полей RUSMARC. В них отражаются сведения о лицах, связанных с Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом с момента его создания до настоящего времени. Подтверждение этих связей основано на общедоступных источниках, архив-

ных материалах и документах [14]. БЗ с записями справочника не объединяются. Доля пересечений справочника «Персоналии_СПбГПУ» и файла «Авторы» (2427&3693=336), соотношение записей с маркером «автор_СПбГПУ» с записями в справочнике 336/1606 – 21 %, что является одной из характеристик достоверности публикуемой информации. Методика VIAF и РНБ предусматривает сохранение «истории заблуждений», т. е. сохранение отвергнутых версий АЗ. Для локальных, а в перспективе – корпоративных, файлов это существенная задача, т. к. РНБ создает связи БЗ и АЗ в объеме поступлений, регулируемых законом «Об обязательном экземпляре документов», а записи на локальном уровне охватывают значительную долю сетевых ресурсов, не депонируемых в фондах национальных библиотек [15]. Возникает противоречие между необходимостью отражения в АЗ все более полного представления сведений об авторе в целях оперативного и достоверного получения необходимой информации, если не в открытых для широкого круга пользователей полях, то хотя бы в полях служебного назначения, и требований конфиденциальности в отношении информации, все более относимой к категории «личной информации» (PII – Personally Identifiable Information).

В программе секции 08/11, Секции по автоматизации, форматам и каталогизации, на XV конференции РБА в 2010 г. были представлены доклады об опыте работы с авторитетными записями в Томском государственном университете и Томском политехническом университете, каждый из них представлял собой анализ эффективности использования методик ведения системы национальных авторитетных/нормативных файлов в работе с авторитетными данными на локальном уровне [16]. Президентской библиотекой имени Б.Н. Ельцина были предложены доклады о состоянии дел в области каталогизации архивных материалов и планов о создании национальной версии формата на базе RUSMARC, сопоставимого по возможностям с зарубежной практикой использования MARC21.

Идентификация авторов – необходимое условие повышения эффективности поиска в информационных системах библиотек всех типов. Электронно-библиотечные системы, ориентированные, прежде всего, на задачи высшей школы, неизбежно накапливают и обрабатывают персональные данные о современных авторах, публикующих свои произведения на различных видах носителей. Соблюдение баланса между защитой информации о личности и использованием персональных данных – актуальная задача междисциплинарного характера, т. к. нормализованные данные об авторах являются основой для наукометрических исследований публикационной активности в сфере образования и науки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Декларация о международных принципах каталогизации [Текст]//Новости Международной федерации библиотечных ассоциаций и учреждений.–2008. –№ 6(75).–С. 15–22.

2. О Концепции инновационной политики Российской Федерации на 1998–2000 годы [Электронный ресурс]: постановление Правительства Рос. Федерации от 24.07.1998 № 832//Информационно-правовой портал «Гарант».–Режим доступа: http://base.garant.ru/179112.htm.

3. О персональных данных [Электронный ресурс]: федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ// Информационно-правовая система «Консультант Плюс».–[М.], 1997–2010.–Режим доступа: http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=103154.

4. Национальный узел Интернет-безопасности в России [Электронный ресурс].–Режим доступа: http://www.saferunet.ru.

5. Региональный сайт детских библиотек [Электронный ресурс]/Ленинградская областная детская библиотека.–[СПб.], 1998–2010.–Режим доступа: http://deti.spb.ru.

6. Директора-ректоры Политехнического [Электронный ресурс]: справочное издание / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Фундаментальная библиотека.–СПб., 2006–2007.–(Политех в лицах).–Режим доступа: http://pvl.unilib.neva.ru/dr.

7. Научная электронная библиотека «eLIBRARY.RU» [Электронный ресурс].–М., [Б. г.].–Режим доступа: http://www.elibrary.ru.

8. VIAF: The Virtual International Authority File [Электронный ресурс]/OCLC.–[Б. м.], 2010.–Режим доступа: http://viaf.org/.

9. VIAF (Виртуальный международный авторитетный файл) : авторитетные файлы имен, связывающие Немецкую библиотеку и Библиотеку Конгресса США/Р. Беннетт [и др.]//Новости Международной федерации библиотечных ассоциаций и учреждений. –2007. –№ 6(69).–С. 35–43.

10. Письмо Министерства образования и

науки Российской Федерации от 16.12.2009 № ИК-1766/03 во исполнение поручения Президента Российской Федерации от 31.10.2009 № ПР-2920 [Электронный ресурс]/Электронная библиотека «КнигаФонд».–[Б. м.], 2008-2010.–Режим доступа: http://www.knigafund.ru/docs/ob_obespechenii_dostupom_k_ebs.pdf.

11. Конвенция Совета Европы о защите личности в связи с автоматической обработкой персональных данных от 28 января 1981 г. с изменениями 1999 г. [Электронный ресурс]//Защита информации открытого доступа: [сайт]/Компания «Информзащита».–М., 1995–2010.–Режим доступа: http://www.zki.infosec.ru/law/personal/doc/137/.

12. Заявление ИФЛА о доступе к информации, соотносимой с личностью, в архивных записях [Текст]// Новости Международной федерации библиотечных ассоциаций и учреждений.–2009.–№ 3(78).–С. 12–13.

13. О некоторых вопросах, возникающих в связи с введением в действие части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации [Электронный ресурс]: постановление Пленума Верховного Суда Рос. Федерации и Пленума Высшего Арбитражного Суда Рос. Федерации от 26.03.2009 № 5/29//Информационно-правовой портал «Гарант».–Режим доступа: http://www.garant.ru/hotlaw/doc/135099.htm.

14. Об архивном деле в Российской Федерации [Электронный ресурс]: федеральный закон от 22.102004 № 125-ФЗ//Информационно-правовая система «Консультант Плюс».–Режим доступа: http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=76997.

15. Об обязательном экземпляре документов [Электронный ресурс]: федеральный закон от 29.12.1996 № 77-ФЗ://Информационно-правовая система «Консультант Плюс». –Режим доступа: http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=78626.

16. Материалы XV Конференции РБА [Электронный ресурс]//РБА: [сайт]/Российская библиотечная ассоциация.–[СПб.], 2005–2010.–Режим доступа: http://www.rba.ru/conference/tomsk/programm.pdf.

УДК 004.942

А.Д. Таземдинов

О РЕЗУЛЬТАТАХ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА УСВОЕНИЯ ЗНАНИЙ В ЕСТЕСТВЕННО-ЯЗЫКОВОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ

Необходимость проверки обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, выдвинутых в работах [1–4], и связанных с разработкой математической модели усвоения знаний, требовала проведения эксперимента. Цель исследования – проблема повышения качества обучения в современных условиях интенсификации обучения, которая, по мнению автора, может быть решена за счет внедрения в учебный процесс новейших компьютерных технологий обучения.

Эксперимент проводился с применением специально разработанного естественно-языкового модуля для компьютерной обучающей среды Moodle [5], использующего в своей работе созданные математические модели. Модуль позволяет имитировать наиболее эффективный на сегодняшний день механизм личностно-ориентированного диалогового репетиторского обучения.

Методика проведения и результаты эксперимента

Посредством сравнения оценок, выставленных преподавателями студентам контрольной и экспериментальной групп, осуществлялась проверка следующих гипотез:

H_0 – уровень понимания учебного материала (УМ) студентами стохастически (вероятностно) зависит от их уровня обучаемости, т. е. естественно-языковая обучающая система не оказывает существенного влияния на уровень понимания УМ;

H_1 – различия в уровне понимания УМ между обоими распределениями достаточно значительны и связаны с использованием естественно-языковой обучающей системы.

Эксперимент проводился на базе Международного банковского института в Санкт-Петербурге

в 2008 г. [6]. Из студентов первого курса были организованы две относительно равные по уровню знаний выборки по 40 человек. Обе группы, контрольная и экспериментальная, изучали информатику согласно календарно-тематическому плану по методике, включающей в себя, кроме лекционных и практических занятий, использование обучающей среды Moodle и электронных учебно-методических комплексов. В случае необходимости студенты как экспериментальной, так и контрольной группы могли обратиться за помощью к преподавателю или коллегам по группе посредством чата, форума или системы электронных сообщений. В качестве самостоятельной работы на этапе запоминания и повторения учебного материала экспериментальной группе было предложено использовать естественно-языковую обучающую систему. Для проведения эксперимента были специально подготовлены 140 обучающих диалогов, которые объединили в наборы по пять диалогов. Наборы разделили на три категории по уровням сложности. Студенты экспериментальной группы должны были набрать максимальный балл на каждом уровне сложности. Сколько раз нужно пройти тот или иной диалог для понимания учебного материала, определялось самим студентом. Время прохождения диалога также не ограничивалось. Такой механизм проведения эксперимента должен был переключить студентов с пассивного восприятия информации к ее активному переосмыслению.

Продолжительность эксперимента составляла один семестр. Оценивание знаний студентов до и после эксперимента осуществлялось на основании обезличенных письменных работ. Для того чтобы преподаватели, оценивающие работы, не знали, какому студенту принадлежит конкретная работа, каждой работе случайным образом присваивался идентификационный номер. Соотнесение номеров с группами проводилось после оценивания всех работ. Уровень знаний оценивался тремя преподавателями в контрольной и экспериментальной группах до и после проведения эксперимента рейтинговым методом по 100-балльной шкале. Усредненный результат подсчитывался по формуле:

$$\mu(k) = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_i}{n},$$

где k – студент; n – количество преподавателей ($n = 3$); $n_i \in \overline{0,1}$ – оценка, выставленная i-м преподавателем.

Сравнение оценок, выставленных преподавателями, осуществлялось с использованием критериев Стьюдента и χ^2 (хи-квадрат). Для контроля результатов было решено выполнить дополнительную проверку с применением непараметрического критерия Вилкоксона–Манна–Уитни. Проверка гипотезы о нормальном распределении выборок выполнялась с применением критерия Пирсона. Все расчеты проводились для уровня значимости $\alpha = 0{,}05$, т. е. с вероятностью ошибки равной 5 %. Распределение оценок в обеих группах до эксперимента показано на рис. 1. На графике видно, что уровни знаний в обоих группах достаточно близки. Расчеты статистических критериев t-критерия Стьюдента и χ^2 показали, что эмпирические значения критериев меньше их табличных значений $t_{эмп} < t_{кр}$ (0,34 < 1,99) и $\chi^2_{эмп} < \chi^2_{кр}$ (1,14 < 7,81). Следовательно, выборка произведена правильно, обе группы принадлежат одной генеральной совокупности и можно проводить эксперимент.

После окончания эксперимента преподавателями была выполнена повторная проверка уровня знаний студентов контрольной и экспериментальной групп. Оценки распределились следующим образом (рис. 2).

Результатирующие данные выборок были сгруппированы в статистические ряды, состоящие из четырех столбцов (категорий оценок) (рис. 3).

После проведения эксперимента произошло перераспределение оценок из категории «удовлетворительно» в категории «хорошо» и «отлично». Причем в экспериментальной группе этот сдвиг выражен сильнее. Сравнивая полученное в эксперименте значение t с табличным значением с учетом степеней свободы, получаем $t_{эмп} > t_{кр}$ (16,05 > 2,02). Следовательно, нулевая гипотеза, по которой различия уровня подготовленности обучающихся недостаточно значительны, отклоняется и принимается альтернативная, согласно которой различия между обоими распределениями достаточно значительны и связаны с повышением эффективности учебного процесса за счет использования естественно-языковой обучающей системы. Зная, что закон распределения оценок в экспериментальной и контрольных группах нормальный, для дополнительной проверки различия между средними был осуществлен расчет F-критерия Фишера. Расчеты показали, что

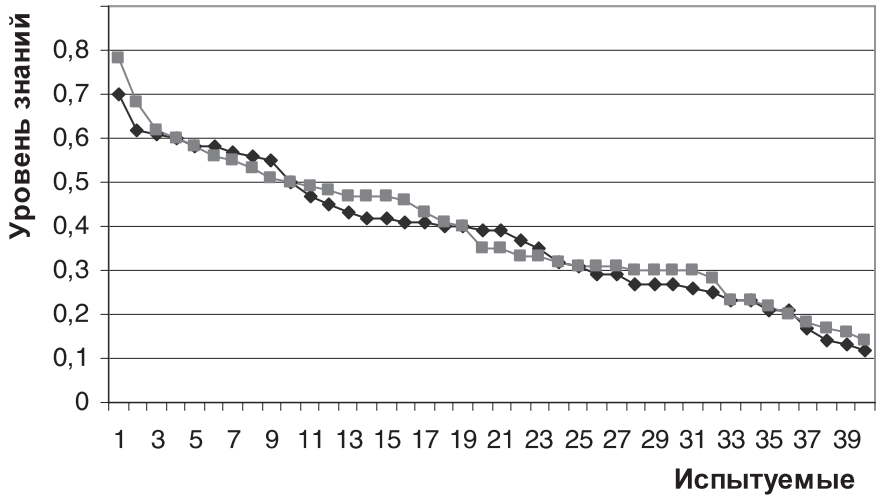


Рис. 1. Уровень знаний студентов контрольной и экспериментальной групп до эксперимента
(—◆—) эксп. гр.; (—■—) контр. гр.

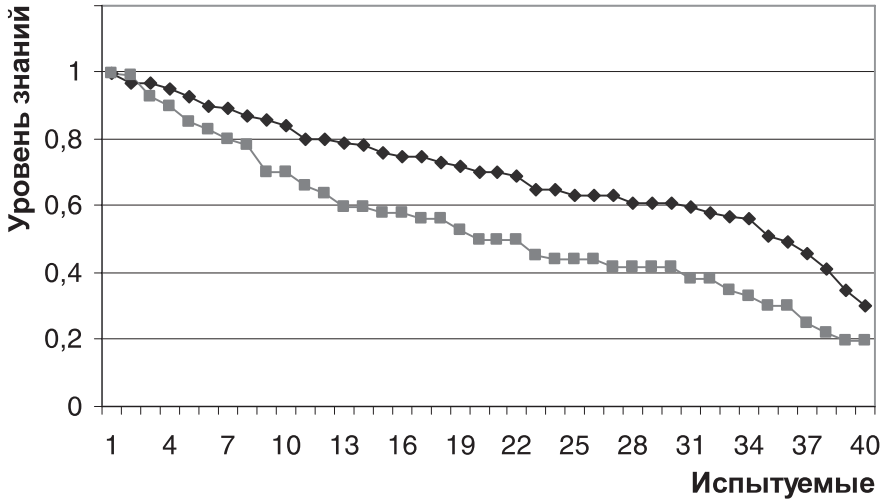


Рис. 2. Уровень знаний студентов контрольной и экспериментальной групп после эксперимента
(—◆—) эксп. гр.; (—■—) контр. гр.

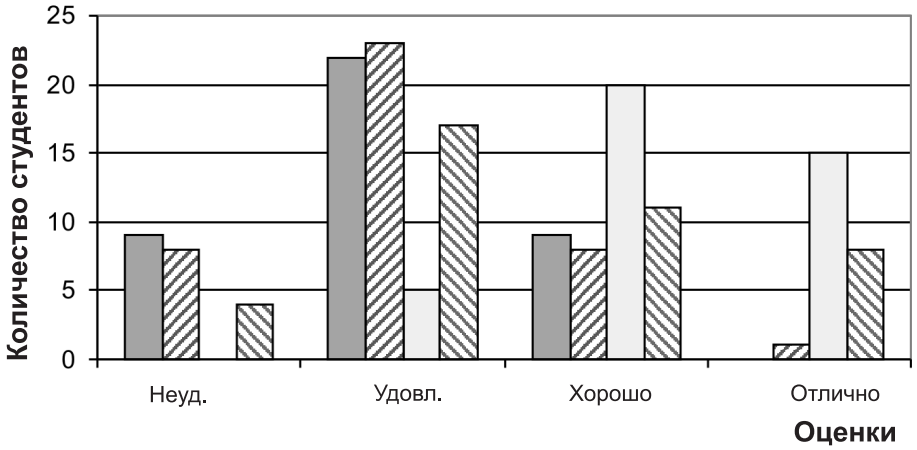


Рис. 3. Распределение студентов по категориям оценок после эксперимента
(■) эксп. гр. до экс.; (▨) контр. гр. до экс.; (□) эксп. гр. после экс.; (▧) контр. гр. после экс.

$F_{эмп} > F_{кр}$ (13,07 > 3,96), следовательно, различие между средними значениями оценок экспериментальной и контрольной групп статистически значимо.

Анализ результатов сдачи сессионных экзаменов за 11 лет

Достоверность вышеописанного эксперимента подтверждается результатами статистического анализа итогов сдачи сессионных экзаменов за одиннадцать лет на факультете заочного обучения Международного банковского института. На этом факультете с 2000 г. для управления самостоятельной подготовкой слушателей используется автоматизированная обучающая среда «ВУОКСа» [7], а с 2005 г. для отдельных групп дисциплин и естественно-языковая обучающая система [5]. Для сравнительного анализа были взяты две группы дисциплин, изучаемые слушателями факультета в рамках учебных программ: математические и информационные. Первая группа – это традиционные математические дисциплины (линейная алгебра и геометрия, теория вероятностей и математическая статистика), где естественно-языковая обучающая система в учебном процессе никогда не использовалась. Вторая – это информационные дисциплины (информатика, информационные системы в экономике, информационные технологии в экономике и управлении), где в дополнение к обучающей среде «ВУОКСа», начиная с 2005 г. используется естественно-языковая обучающая система.

Возможность проведения сравнительного анализа средних показателей оценок по годам обучения для разных групп дисциплин основывался на том, что эти дисциплины сдавались одними и теми же слушателями, и при прочих равных условиях общая динамика распределения оценок по обеим группам дисциплин должна была быть схожа. Эта закономерность подтверждается с помощью анализа статистики сдачи сессионных экзаменов студентами I курса факультета очного обучения МБИ по некоторым дисциплинам (табл. 1). Пронормировав данные таблицы для каждой из дисциплин по их среднему значению за весь период наблюдения, были построены графики распределения средних значений оценок по годам обучения (рис. 4).

На рисунке видно, что конфигурации графиков достаточно схожи. То есть при неизменности условий обучения средний уровень знаний, показанный при сдаче экзаменов одними и теми же студентами по разным дисциплинам, зависит, в основном, от года набора, а разница в показателях средних для каждой из дисциплин – от особенностей (сложности) самой дисциплины. Следовательно, несмотря на разницу средних значений оценок по наблюдаемым годам, средние значения

Таблица 1

Результаты сдачи сессионных экзаменов по некоторым дисциплинам студентами I курса факультета очного обучения

Год	Дисциплины				Общее количество наблюдений
	Линейная алгебра	Математический анализ	Экономическая теория	Информатика	
2001	3,82	3,67	3,89	3,95	712
2002	3,95	3,9	4,08	4,15	816
2003	4,08	3,99	4,15	4,27	928
2004	3,9	3,84	4,09	4,12	1024
2005	3,89	3,71	4,06	4,1	1472
2006	4,12	3,96	4,2	4,23	1056
2007	3,87	3,69	3,94	4,01	1112
2008	3,83	3,65	4,01	4,03	1104
2009	3,9	3,66	4,02	4,07	1128
Общее среднее	3,93	3,79	4,05	4,1	9352

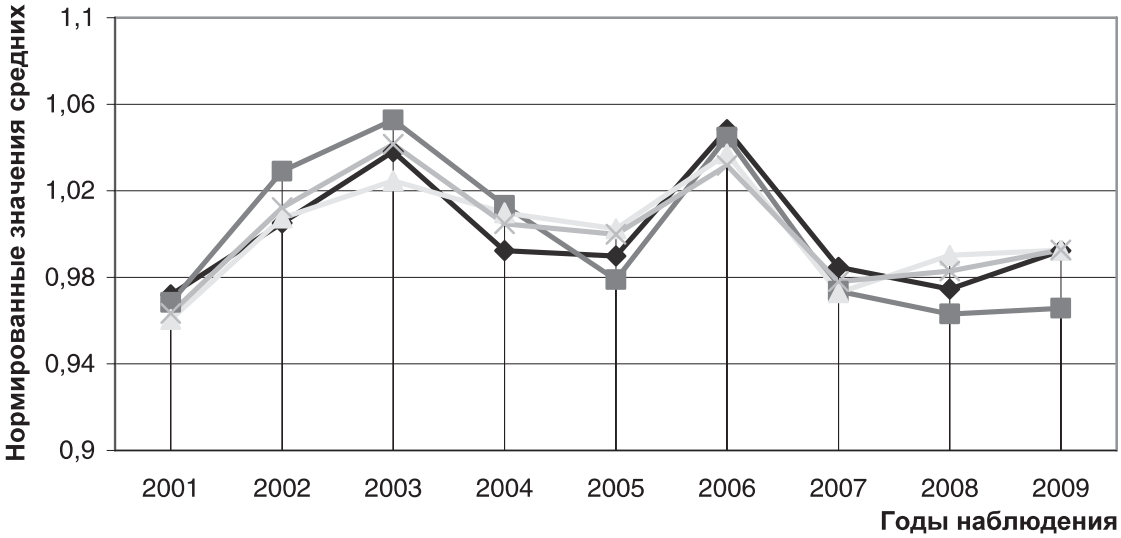


Рис. 4. Распределение средних значений оценок сдачи сессионных экзаменов по некоторым дисциплинам студентами I курса факультета очного обучения
(—◆—) линейная алгебра; (—■—) математический анализ; (—▲—) экономическая тория; (—×—) информатика

оценок двух произвольно взятых и относительно равноценных по времени периодов (например, до 2005 г. и с 2005 г., когда начала использоваться естественно-языковая обучающая система) должны быть статистически неразличимы.

В случае, когда в одной группе дисциплин статистически значимых различий в показателях средних нет, а в другой имеются, можно сделать предположение о влиянии на результаты сдачи сессионных экзаменов в этой группе некоторого фактора (в данном случае – естественно-языковой обучающей системы), отсутствующего в альтернативный период времени. Результаты сдачи сессионных экзаменов по годам и категориям оценок для группы математических дисциплин приведены в табл. 2.

С учетом того, что в учебном процессе для этой группы дисциплин естественно-языковая обучающая система никогда не использовалась, предполагается, что если разделить представленную совокупность данных на два периода до 2005 г. и с 2005 г., значения средних за оба периода будут статистически неразличимы.

Полученные результаты расчетов статистических критериев *F*-критерия Фишера для однофакторного дисперсионного анализа

Таблица 2

Результаты сдачи сессионных экзаменов по годам и категориям оценок для группы математических дисциплин

Год	Количество оценок по категориям				Среднее	Дисперсия
	2	3	4	5		
2002	11	49	58	26	3,69	0,73
2003	16	236	189	111	3,72	0,66
2004	27	193	229	97	3,73	0,65
2005	23	180	202	96	3,74	0,67
2006	47	186	232	144	3,78	0,80
2007	53	110	164	99	3,73	0,91
2008	49	195	131	127	3,67	0,92
2009	2	18	14	13	3,81	0,81

Таблица 3

Результаты сдачи сессионных экзаменов по годам и категориям оценок для группы информационных дисциплин

Год	Количество оценок по категориям				Среднее	Дисперсия
	2	3	4	5		
1999	0	7	10	0	3,59	0,26
2000	8	23	30	22	3,80	0,90
2001	10	30	37	27	3,78	0,89
2002	7	51	73	38	3,84	0,67
2003	17	111	142	101	3,88	0,74
2004	31	138	230	133	3,87	0,73
2005	19	129	231	170	4,01	0,68
2006	13	120	236	207	4,11	0,65
2007	26	115	217	182	4,03	0,74
2008	27	163	265	195	3,97	0,72
2009	0	14	25	31	4,24	0,59

$F_{эмп} < F_{кр}$ (0,25 < 3,84) и *t*-критерия Стьюдента $t_{эмп} < t_{кр}$ (0,33 < 1,96) позволяют сделать вывод об относительном равенстве способностей и подготовки слушателей в сравниваемые периоды времени и о схожих условиях и методологии обучения. В связи с тем, что особой разницы в уровне подготовки слушателей факультета по математическим дисциплинам в сравниваемых периодах времени не наблюдается, можно предположить, что для тех же самых слушателей при прочих равных условиях аналогичная тенденция в распределении оценок будет прослеживаться и для информационных дисциплин (табл. 3).

Данные для группы информационных дисциплин также были разделены на два периода.

В результате расчеты *F*-критерия Фишера для однофакторного дисперсионного анализа показали, что $F_{эмп} > F_{кр}$ (36,1 > 3,84). Аналогичные результаты получены и при расчете *t*-критерия Стьюдента $t_{эмп} > t_{кр}$ (5,71 > 1,96). Следовательно, различие между средними значениями оценок для группы информационных дисциплин за период до 2005 г. и за период с 2005 г. статистически значимо.

Нормирование данных табл. 2 и табл. 3 по показателю 2004 г. позволяет графически сравнить оба набора данных (рис. 5). В отличие от графиков, приведенных на рис. 4, на представленном рисунке видно существенное расхождение графиков, начиная с точки 2004 г. Исходя из того, что за весь наблюдаемый период существенных изменений в преподавательском составе и методике преподавания для группы информационных дисциплин не происходило, можно заключить, что увеличение средних значений оценок после 2004 г. связано с внедрением в учебный процесс естественно-языковой обучающей системы.

Закрашенная область (рис. 5) показывает размер этого прироста. Таким образом, гипотеза о том, что использование естественно-языковой обучающей системы в учебном процессе позволяет повысить уровень знаний обучающихся, подтверждается.

Исследование показало, что экспериментальная технология обучения, с применением естественно-языковой обучающей системы вызывает более сильный сдвиг статистических показателей (в сторону повышения), чем стандартная. Отмечается закономерность, заключающаяся в достижении более высокого уровня знаний в экспериментальной группе после проведения эксперимента по сравнению с контрольной. Статистические доказательства этой закономерности были получены путем количественной обработки результатов педагогического эксперимента с использованием статистических методов *t*-критерия

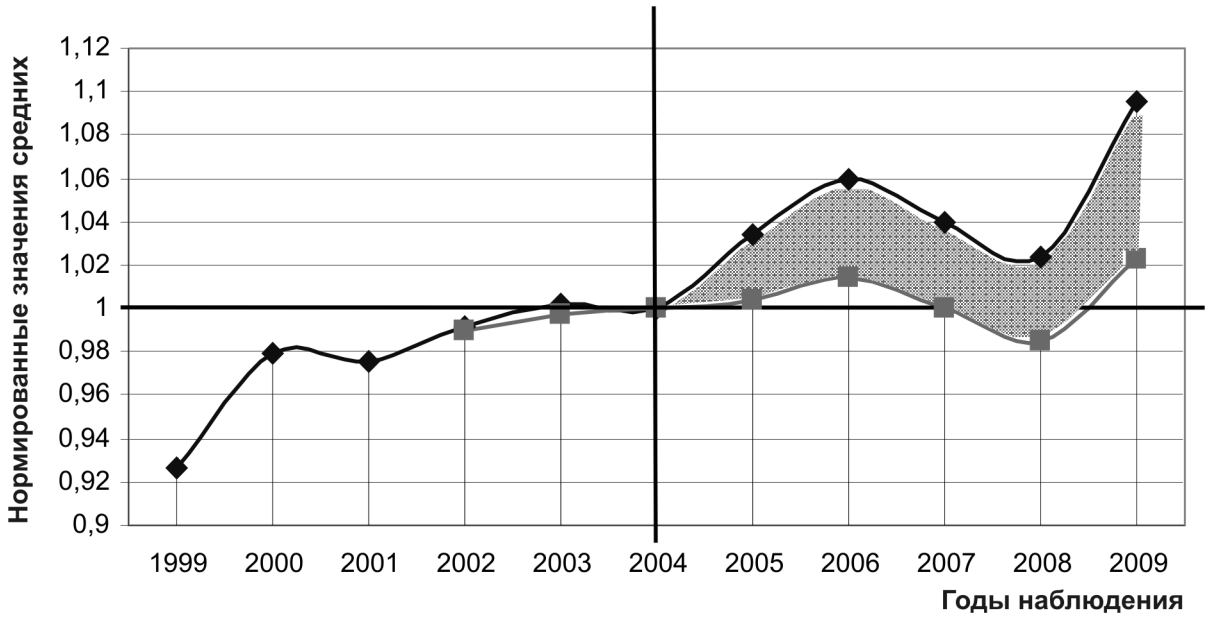


Рис. 5. Распределение средних значений оценок по группе информационных дисциплин до 2005 г. и с 2005 г. (—◆—) информационные дисциплины; (—■—) математические дисциплины

Стьюдента, χ^2 и критерия Вилкоксона–Манна–Уитни. Поскольку после проведения эксперимента для всех проверяемых критериев значение эмпирического показателя критерия было выше его критического значения, можно утверждать, что между результатами проверки уровня знаний в исследуемых группах имеются статистически значимые отличия с вероятностью ошибки, равной 5 %. Следовательно, выдвинутая перед исследованием гипотеза о том, что применение естественно-языковой обучающей системы в учебном процессе является эффективным средством повышения уровня понимания и запоминания учебного материала, подтверждается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тазетдинов, А.Д.** Анализ математических моделей обучения в приложении к компьютерным обучающим системам репетиторского типа [Текст]/А.Д. Тазетдинов//Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2008.–№ 3(60).–С. 191–196.

2. **Тазетдинов, А. Д.** Математическая модель усвоения знаний для компьютерных систем репетиторского типа [Текст]/А.Д. Тазетдинов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2008.–№ 4(62).–С. 134–140.

3. **Тазетдинов, А. Д.** Об использовании графов понятий для структурирования и управления информацией в автоматизированных обучающих системах [Текст]/А.Д. Тазетдинов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 5(86).–С. 7–12.

4. **Тазетдинов, А. Д.** Математические модели процесса усвоения знаний в автоматизированных обучающих системах: Монография [Текст]/А.Д. Тазетдинов. –СПб.: ГУАП, 2009.–64 с.

5. Модуль вопросов открытого типа к LMS-системе Moodle: А.С. 11711 ОФАП [Текст]/А.Д. Тазетдинов, А.И Стригун.–№ ГР 50200802191//Сб. Алгоритмы и программы.–М.: ВНТИЦ, 2008.

6. **Тазетдинов, А. Д.** Результаты проверки эффективности репетиторской обучающей системы [Текст]/ А.Д. Тазетдинов, А.И. Стригун//Экономика и управление.–2008.–№ 6(38).–С. 205–210.

7. Система тестирования с использованием свободного ответа: А.С. 4229 ОФАП [Текст]/А.Д. Тазетдинов, А.И Стригун.–№ ГР 50200500081//Сб. Алгоритмы и программы.–М.: ВНТИЦ, 2005.

УДК 681.3.06

И.Б. Герасимова

КОГНИТИВНЫЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОБЩЕНИЯ ДВУХ ЛИЧНОСТЕЙ

В социологии при изучении малых групп, коллективов, организаций на первый план встает понятие индивида, личности. Социологи в понятиях «индивид» и «личность» подчеркивают лишь целостность их психофизиологической организации, ее единство.

В социологии описание структуры личности происходит на дискуссионно-вербальном уровне и заканчивается предложением исследователей тех или иных моделей структуры личности. Формализованное описание этих моделей отсутствует. Автор статьи делает попытку решения этой задачи.

Рассмотрим структуру личности с позиции системной методологии. По мнению А.В. Петровского «личностью в психологии обозначается системное социальное качество, приобретаемое индивидом в предметной деятельности и общении и характеризующее меру представленности общественных отношений в индивидууме». По мнению автора, личность многогранна и представляет собой сложную систему. В современной психологии существует большое многообразие моделей и теорий о структуре личности.

А.Г. Ковалев [2, 5] в структуру личности включает четыре системообразующих фактора: психические процессы (ощущение, восприятие, представление, память, воображение, речь, мышление, внимание); психологические свойства (темперамент, характер, способности, эмоционально-волевая сфера личности); психические состояния; психологические образования (знания, умения, навыки).

К.К. Платонов [5] выделяет также четыре фактора: биологический (темперамент, возрастные особенности, половые различия); психологический (психические процессы, характер, способности, чувства, эмоции, воля); социальный опыт (общение в коллективе, отношение к людям, к общественным обязанностям); направленность личности.

С.Л. Рубинштейн [6] определяет личность через триаду (триединство): отношение и направленность (это то, что человек хочет – «я хочу»); способности как человеческие возможности и потенции (это то, что человек может – «я могу»); характер как доминирующие и устойчивые тенденции использования, реализации и расширения возможностей (это то, что есть человек с мотивациями и целеполаганием).

Психолог А.Н. Леонтьев [4, 5] выделяет другие четыре фактора: направленность личности; способности; характер; самоконтроль.

Эти модели структуры личности носят скорее общесоциальный характер. Поэтому для каждого социального процесса целесообразно создавать модель структуры личности, участвующей в этом социальном процессе.

В целом в личности можно выделить две составляющие: биологическую (эндопсихика) и социальную (экзопсихика), которые в структуре личности представляют собой единое целое и механически не могут быть разделены и противопоставлены друг другу и которые должны быть учтены при моделировании структуры личности.

Когнитивная модель структуры личности

Основываясь на предложенной триадной теории [1], автор рассматривает структуру личности как одного из создателя проекта, обладающего устойчивой психикой, умеющего думать и осознавать за счет своего интеллекта и творчески реализовывать целенаправленную деятельность. Следовательно, структура личности есть триединство (триада):

интеллектуальной деятельности (мышления, сознания);

организационно-трудовой, творческой, целенаправленной деятельности;

психоэмоционального состояния (ПС), стремящегося поддержать устойчивость этих видов деятельности.

Данное понятие отражает личность как активный элемент системы. На основе изложенного составим когнитивную карту личности (научного руководителя или научного сотрудника) как одного из создателей научного проекта (рис. 1). Здесь личность представлена в

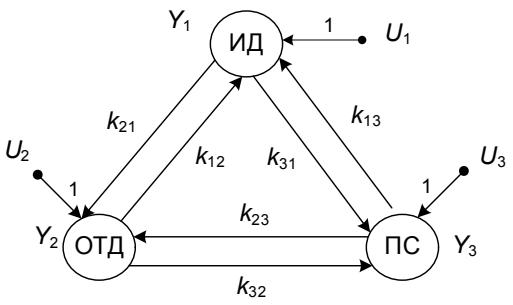


Рис. 1. Когнитивная модель структуры личности

виде триады концептов: Y_1 отражает темп интеллектуальной деятельности (ИД), Y_2 – темп организационно-трудовой деятельности (ОТД), Y_3 – темп изменения психоэмоционального состояния личности. При этом $U = \langle U_1, U_2, U_3 \rangle$ – вектор внешних воздействий, определяющий, в частности, вклад личности в указанные виды деятельности.

Сила и характер влияния каждого концепта друг на друга у каждой личности сугубо индивидуальны.

На каждый концепт оказывают влияние внешние факторы U_i, характер действия которых может быть, по крайней мере, четырех видов: управляющий, стабилизирующий, дестабилизирующий, нейтральный. По силе и по форме эти действия также носят различный характер: слабые и сильные, импульсные и постоянные, синусоидальные и плавные и т. п.

Смысл коэффициентов взаимодействия также различен:

k_{21} – отражает, насколько интеллект оказывает влияние на трудовую деятельность;

k_{12} – насколько трудовая деятельность активизирует интеллект;

k_{13} – насколько психоэмоциональное состояние влияет на интеллектуальную деятельность;

k_{31} – насколько интеллект влияет на изменение состояния психики личности;

k_{23} – насколько изменение состояния психики отражается на трудовой деятельности;

k_{32} – отражает влияние трудовой деятельности на изменение состояния психики.

Положительность знаков у коэффициентов между каждой парой концептов говорит о благоприятном влиянии друг на друга. Сложность исследования заключается в том, что некоторые коэффициенты могут менять свои знаки на противоположные. Так, психоэмоциональное состояние меняет свое отношение (знак «+» на знак «–») к интеллектуальной и трудовой деятельности, сдерживая их темп деятельности с целью самосохранения системы, например, с целью снижения утомляемости личности.

Данная динамическая когнитивная модель может быть описана следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} T_1\dot{Y}_1 + Y_1 &= k_{12}Y_2 + k_{13}Y_3 + U_1, \\ T_2\dot{Y}_2 + Y_2 &= k_{21}Y_1 + k_{23}Y_3 + U_2, \\ T_3\dot{Y}_3 + Y_3 &= k_{31}Y_1 + k_{32}Y_2 + U_3, \end{aligned} \qquad (1)$$

где T_i – постоянные времени, учитывающие инерционность изменения концептов.

Решение этой системы уравнений в статике имеет вид:

$$\Delta Y_i = \Delta_i U, \qquad (2)$$

где Δ – главный определитель Крамера, равный

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -k_{12} & -k_{13} \\ -k_{21} & 1 & -k_{23} \\ -k_{31} & -k_{32} & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= 1 - (k_{12}k_{21} + k_{13}k_{31} + k_{23}k_{32}) + k_{12}k_{23}k_{31} + k_{13}k_{32}k_{21}.$$

Знак «–» говорит о положительной обратной связи в замкнутых контурах.

Δ_i – частный определитель, получаемый заменой соответствующего столбца главного определителя вектором входных координат $U = [U_1, U_2, U_3]$. Тогда решение (2) запишем в виде:

$$\Delta \bullet Y_1 = (1 - k_{32}k_{23})U_1 + (k_{12} + k_{32}k_{13})U_2 + (k_{13} + k_{12}k_{23})U_3,$$

$$\Delta \bullet Y_2 = (k_{21} + k_{23}k_{31})U_1 + (1 - k_{13}k_{31})U_2 + (k_{23} + k_{13}k_{21})U_3,$$

$$\Delta \bullet Y_3 = (k_{31} + k_{21}k_{32})U_1 + (k_{32} + k_{12}k_{31})U_2 + (1 - k_{21}k_{12})U_3.$$

Следовательно, каждое управляющее воздействие U_i влияет на каждый концепт. Отметим, что условие устойчивости системы на установившемся (динамически равновесном) режиме запишется следующим образом:

$$\Delta. > 0. \qquad (3)$$

Активизация трудовой деятельности изменяет психоэмоциональное состояние. Изменение психики отражается на состоянии интеллекта и на трудовой деятельности. А изменение интеллекта под влиянием какой-либо «блестящей идеи» активизирует психику и деловое состояние личности.

Можно отметить, что в малой научной группе у каждого участника проекта задействованы все три концепта: интеллектуальный (мыслительная

деятельность), деловой (поведенческий) и психический (эмоциональный).

Когнитивная модель взаимодействия двух личностей

Далее на основе разработанной модели структуры личности рассмотрим модель взаимодействия двух личностей, например, научного руководителя (НР) и научного сотрудника (НС) на трех уровнях:

интеллектуальном;

организационно-трудовом, в т. ч. при постановке и проведении научных экспериментов;

психоэмоциональном.

Для успешной работы над проектом необходимо:

чтобы уровни профессиональных знаний НР и НС были близки;

трудовые действия НР и НС были скоординированы, согласованы;

НР и НС были психологически совместимы, т. е. имели близкие точки зрения как на понимание научной проблемы, так и на методы, способы ее решения, а также на планируемые и проводимые организационно-управленческие мероприятия, способствующие эффективному решению проекта.

На рис. 2 представлена схема общения НР и НС при планировании работ над проектом на трех вышеуказанных уровнях.

Интеллектуальное взаимодействие определяется коэффициентами c_{12}, c_{21}, организационно-трудовое – коэффициентами d_{12}, d_{21}, психоэмоциональное взаимодействие – коэффициентами e_{12}, e_{21}. Положительное значение коэффициентов говорит о стремлении этих двух личностей всячески оказывать помощь и поддержку друг другу как интеллектуальную, так и трудовую, а также и психологическую. Данная когнитивная модель общения двух личностей на установившемся (динамически равновесном) режиме описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
Y_1 &= k_{12}\mathrm{Y}_2 + k_{13}\mathrm{Y}_3 + c_{12}X_1 + U_{y1},\\
Y_2 &= k_{21}\mathrm{Y}_2 + k_{23}\mathrm{Y}_3 + d_{12}X_2 + U_{y2},\\
Y_3 &= k_{31}\mathrm{Y}_1 + k_{32}\mathrm{Y}_2 + e_{12}X_3 + U_{y3},\\
X_1 &= b_{12}X_2 + b_{13}X_3 + c_{21}Y_1 + U_{x1},\\
X_2 &= b_{21}X_1 + b_{23}X_3 + d_{21}Y_2 + U_{x2},\\
X_3 &= b_{31}X_1 + b_{32}X_2 + e_{21}Y_3 + U_{x3}.
\end{aligned} \qquad (4)$$

Главный определитель Гурвица равен:

$$\Delta = \begin{vmatrix}
1 & -k_{12} & -k_{13} & -c_{12} & 0 & 0\\
-k_{21} & 1 & -k_{23} & 0 & -d_{21} & 0\\
-k_{31} & -k_{32} & 1 & 0 & 0 & -e_{12}\\
-c_{21} & 0 & 0 & 1 & -b_{12} & -b_{13}\\
0 & -d_{21} & 0 & -b_{21} & 1 & -b_{23}\\
0 & 0 & -e_{21} & -b_{31} & -b_{32} & 1
\end{vmatrix} = 1 - K,$$

где K – количество всех замкнутых контуров. В данном случае количество контуров, образованных двумя концептами, будет равно 9 (рис. 2), тремя концептами – 4, четырьмя – 6 и т. д. При этом на равновесном режиме должно быть соблюдено условие (3) .

Полученные модели в дальнейшем используются при когнитивном анализе свойств струк-

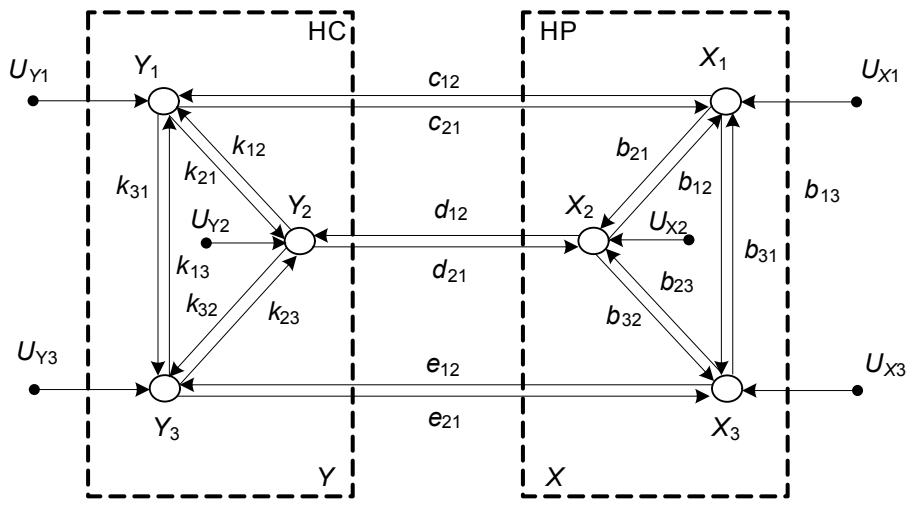


Рис. 2. Когнитивная модель общения двух личностей Y (НС) и X (НР)

туры личности и особенностей взаимодействия двух личностей.

Когнитивный анализ структурных свойств личности на основе моделирования

В основу данного анализа положена когнитивная модель личности, представленная на рис. 1.

Задача исследования заключалась в том, чтобы выяснить:

1. Как меняются темпы интеллектуальной и организационно-трудовой деятельности, а также уровень эмоционального состояния личности при внешних воздействиях.

2. Как меняются темпы интеллектуальной и организационно-трудовой деятельности, а также уровень эмоционального состояния при изменении отношений (знаковом и количественном) между этими концептами.

3. Когда личность достигает максимальной и минимальной производительности.

При моделировании был сделан ряд допущений:

не учитывались биологические потребности человека;

личность считалась более способной, если она при одних и тех же внешних условиях обеспечивала более высокую производительность труда как интеллектуального, так и физического. «Превосходство» одной личности над другой достигалось настройкой внутренних коэффициентов;

предполагалось, что изменения темпов интеллектуальной, физической деятельности и эмоционального состояния подчиняются экспоненциальному закону;

предполагалось, что внутренне личность полностью осознает свои действия и в результате этого направляет их на достижение максимальной производительности, не причиняя себе вреда;

внутренние ограничения на изменения концептов личности не ставились, они ограничивались силой внешних воздействий;

время и коэффициенты взаимодействия взяли безразмерными, а сами коэффициенты менялись от 0 до 1;

знак «–» формирует отрицательную связь, а знак «+» – положительную связь.

Схема моделирования структуры личности, соответствующая системе уравнений 1, представлена на рис. 3.

Автор ограничился рассмотрением отдельных ситуаций, поскольку они в достаточной мере описывают свойства системы.

Ситуация 1. В когнитивной модели (рис. 1) для простоты все коэффициенты K_{ij} взяты положительными и равными друг другу: $K_{ij} = K_{ji} = 0{,}4$, т. е. взаимодействие между концептами симметрично и обеспечивает устойчивость на равновесном режиме, условие (3). Положительность значений коэффициентов означает, что все концепты помогают друг другу. При этом внешнее воздействие также взято одинаковым и равным единице, это означает максимальный темп вложения в проект каждого концепта в автономном режиме.

В этом случае максимальный темп деятельности, который может выдать данная структура личности по каждому концепту составляет 5, что является результатом синергетического эффекта. Если коэффициенты взаимодействия $K_{ij} = K_{ji}$ увеличивать с 0,4 и выше, то рост максимального значения концептов будет происходить по формуле:

$$Y_{\max i} = \frac{0{,}5}{0{,}5 - K_{ij}}, \qquad (5)$$

т. е. при $K_{ij} = K_{ji} = 0{,}45$, $Y_1 = Y_2 = Y_3 = 10$ и т. д.

Так как система линейная, то при уменьшении входных воздействий концептов в два раза конечные значения Y_i также уменьшатся в два раза.

Если воздействия между концептами сделать несимметричными, например, при $\forall i: U_i^0 = 1$, а $K_{12} = 0{,}6$, $K_{21} = 0{,}7$, $K_{13} = 0{,}1$, $K_{32} = 0{,}1$, $K_{31} = 0{,}2$, $K_{23} = 0{,}2$, то $Y_1 = 3{,}56$, $Y_2 = 3{,}91$, $Y_3 = 2{,}1$, т. е. при несимметричном и слабом взаимодействии конечный результат будет значительно меньше $Y_{\max} = 5$.

Отметим, что при $K_{ij} = K_{ji} \geq 0{,}5$ состояние системы на равновесном режиме становится неустойчивым.

Ситуация 2. Коэффициенты $K_{ij} = K_{ji} = 0{,}4$. Если ко второму концепту (трудовая деятельность) приложено внешнее усилие $U_2 = 1$, а внешние усилия на интеллектуальную деятельность и на психически эмоциональные концепты будут равны $U_1 = U_3 = 0$, т. е. будут отсутствовать, то получим следующий результат: $Y_2 = 2{,}15$ $Y_1 = Y_3 = 1{,}43$. Следовательно, здесь наблюдается то, что труд активизирует интеллектуальную и эмоциональную формы деятельности, которые, в свою очередь, повышают более чем в два раза производительность физического труда, но не достигая ее максимума.

Ситуация 3. Если в ситуации 2 наступает «конфликт» между эмоциями (Y_3) и трудом (Y_2),

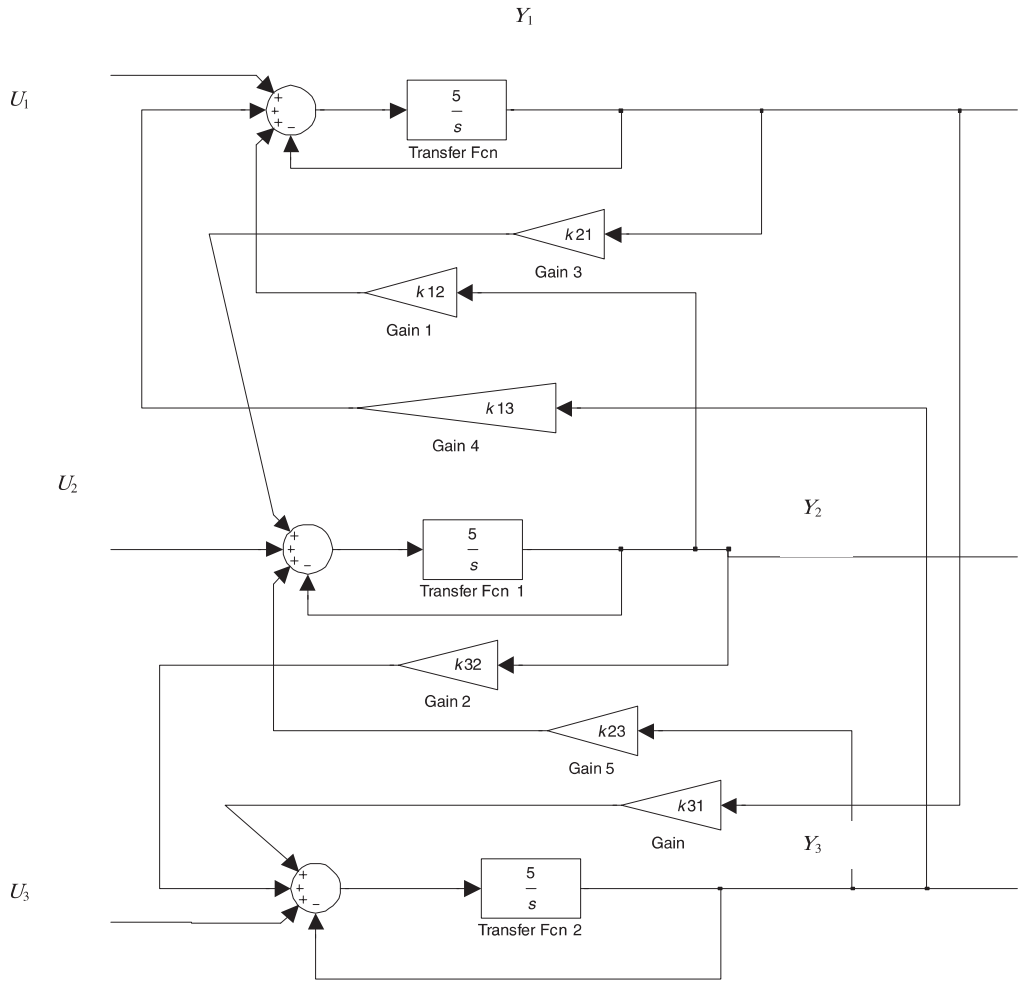


Рис. 3. Схема моделирования структуры личности

т. е. $K_{32} = –0,4$, то получим: $Y_1 = 0,28$, $Y_2 = 1$, $Y_3 = –0,28$. В этом случае производительность труда по сравнению с ситуацией 2 уменьшилась в два раза (т. е. упала до уровня автономной работы «без ума и без чувств»). При этом интеллектуальная деятельность значительно упала, а личность испытывает отрицательные эмоции из-за внутреннего нежелания помогать трудовой деятельности.

Если в этой ситуации добавить с внешней стороны интеллектуальную деятельность (т. е. $U_1 = U_2 = 1$, $U_3 = 0$), то за счет этого можно повысить производительность труда и полностью погасить отрицательные эмоции, т. к. получается следующее: $Y_1 = 1,66$, $Y_2 = 1,66$, $Y_3 = 0$, т. е. эмоции подавлены интеллектом, который в то же время повышает производительность труда.

Ситуация 4. Если в ситуации 2 ($U_1 = U_3 = 0$, $U_2 = 1$) наступает конфликт, с одной стороны, между эмоциями (Y_3) и трудом (Y_2), а, с другой стороны, между эмоциями (Y_3) и интеллектом (Y_1), т. е. $K_{32} = K_{31} = –0,4$, то получим $Y_1 = 0,19$, $Y_2 = 0,9$, $Y_3 = –0,43$. Следовательно, производительность труда стала меньше автономной работы, а интеллектуальная деятельность подавлена отрицательными эмоциями.

Если включить интеллектуальную и трудовую деятельность (т. е. $U_1 = U_2 = 1$, $U_3 = 0$), то наблюдается повышение трудовых и интеллектуальных концептов ($Y_1 = Y_2 = 1,9$) при очень низкой эмоции ($Y_3 = –0,1$)

Ситуация 5. Если в ситуации 1 существует конфликт между всеми тремя концептами ($K_{32} < 0$, $K_{31} < 0$, $K_{21} < 0$), то положительно действующие внешние эмоции ($U_3 = 1$) не могут спасти положение, $Y_1 = 1,33$, $Y_2 = 0,57$, $Y_3 = 0,24$, т. е. личность так же, как и в случаях 3 и 4 не может достичь

максимального результата, когда $Y_1 = Y_2 = Y_3 = 5$. То же самое повторяется и в ситуации 2.

Анализируя промоделированные ситуации можно сделать следующие выводы.

1. Когнитивная модель структуры личности качественно правильно отражает поведение реальной личности в стандартных ситуациях.

2. Максимальная производительность личности достигается при полной гармонии, взаимопомощи всех трех концептов: интеллектуального, трудового, психоэмоционального.

3. Любой внутренний конфликт между концептами ведет к снижению производительности труда личности, а конфликты между эмоциями и другими концептами приводят к наибольшему снижению производительности труда личности.

Полученные результаты подтверждаются основными теоретическими положениями психологии личности и не противоречат им.

Поскольку модель поведения структуры личности качественно правильно отражает поведение реальной личности при выполнении работ, то она может быть использована для анализа общения людей в МНГ при выполнении научного проекта.

Выше была рассмотрена модель «пассивной» личности, которая описывается системой уравнений (1). Для этой личности характерна единичная обратная отрицательная связь по всем концептам. Далее рассмотрим модель «активной» личности с неединичной обратной отрицательной связью для каждого концепта. Тогда система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{Y}_1 = -a_1 Y_1 + K_{12} Y_2 + K_{13} Y_3 + U_1; \\ \dot{Y}_2 = -a_2 Y_2 + K_{21} Y_1 + K_{23} Y_3 + U_2; \\ \dot{Y}_3 = -a_3 Y_3 + K_{31} Y_1 + K_{32} Y_2 + U_3. \end{cases} \qquad (6)$$

Эта структура личности обладает свойством саморегулирования (самоорганизации) темпов своей деятельности по всем трем направлениям: интеллектуальной, трудовой, эмоциональной за счет изменения коэффициента a_i. При этом уменьшение коэффициента a_i будет способствовать повышению активности соответствующего компонента.

Если взять значения коэффициентов K_{ij} и K_{ji} такими же, как в ситуации 1, а управляющие внешние воздействия также равными $U_i = 1$, где $i = \overline{1,3}$, и уменьшать одновременно коэффициенты a_i, то получим следующие результаты:

при $a_i = 0{,}9$, где $i = \overline{1,3}$, максимальный темп деятельности активной личности $Y_i = 10$;

при $a_i = 0{,}85$, где $i = \overline{1,3}$, максимальный темп деятельности активной личности $Y_i = 20$;

при $a_i = 0{,}8$, где $i = \overline{1,3}$, личность как система находится на границе статической устойчивости, т. е. личность не обладает способностью стабилизации своего состояния.

Если при $a_i = 0{,}9$ увеличить коэффициенты взаимодействия с $K_{ij} = K_{ji} = 0{,}4$ до 0,45, то система находится также на границе статической устойчивости.

Таким образом, активная, самоорганизующаяся личность может достичь большей результативности (эффективности) при выполнении проекта.

Моделирование процесса общения двух личностей

В психологии под общением понимается сложный многоплановый процесс установления и развития контактов между людьми, порождаемый потребностями совместной деятельности и включающий в себя обмен информацией (коммуникативная сторона общения), выработку стратегий делового взаимодействия (интерактивная сторона общения), восприятие и понимание другого человека (перцептивная сторона общения).

В предложенной модели общения (4) некоторые понятия расширены: коммуникативная сторона общения включает не только обмен информацией, но и ее совместную обработку и осмысливание знаний, содержащихся в ней, т. е. включает и мыслительную, интеллектуальную деятельность. А в перцептивную сторону общения включаются психоэмоциональное восприятие мыслительной и деловой деятельности партнера. При этом все три типа общения рассматриваются как единая система со всеми взаимными влияниями друг на друга.

Следовательно, при общении двух личностей при выполнении проекта задействованы все три концепта: интеллектуальный (мыслительная деятельность), трудовой (деловой, поведенческий) и психологический (эмоциональный) (см. рис. 2).

При моделировании, например, у одной личности (*Y*), которая соответствует НС, все коэффициенты взаимодействия взяты положительными и равными $K_{ij} = K_{ji} = 0{,}4$, а у другой личности (*X*), которая соответствует НР, все коэффициенты взаимодействия тоже положительны и равны $K_{ij} = K_{ji} = 0{,}45$. При этом при внутреннем гармоническом взаимодействии в отдельности

(в автономном режиме) личность Y достигает максимальной производительности, равной 5, а личность X – равной 10.

В рассматриваемом случае коэффициенты взаимодействия между соответствующими концептами взяты положительными и равными 0,1, что не нарушает условие (3) статической устойчивости полученной шестимерной системы.

Далее исследовались три ситуации. Во всех трех ситуациях на обеих системах были поданы входные управляющие сигналы: $U_{1x} = U_{2x} = U_{3x} = U_{1y} = U_{2y} = U_{3y} = 1$, т. е. вклад каждого члена МНГ по всем трем концептам был максимален.

Ситуация 1. Рассмотрим последовательно автономное влияние всех видов взаимодействия.

Интеллектуальное взаимодействие личностей:

$c_{12} = c_{21} = 0{,}1$, $d_{12} = d_{21} = e_{12} = e_{21} = 0$.

Получено $Y_1 = 7{,}77$, $Y_2 = Y_3 = 6{,}85$, $X_1 = 12{,}95$, $X_2 = X_3 = 12{,}42$.

При одном только интеллектуальном взаимодействии все показатели концептов у обеих личностей превысили свои максимальные показатели: $Y_i > 5$ и $X_i > 10$. При этом, естественно, интеллектуальные концепты личностей выше показателей остальных концептов, чем при автономной деятельности.

Деловое взаимодействие между личностями:

$d_{12} = d_{21} = 0{,}1$, $c_{12} = c_{21} = e_{12} = e_{21} = 0$.

Получено $Y_2 = 7{,}77$, $Y_1 = Y_3 = 6{,}85$, $X_2 = 12{,}95$, $X_1 = X_3 = 12{,}42$.

Здесь также деловые показатели личностей выше, чем при их автономной деятельности.

Эмоциональное взаимодействие между личностями:

$e_{12} = e_{21} = 0{,}1$, $c_{12} = c_{21} = d_{12} = d_{21} = 0$.

Получено $Y_3 = 7{,}77$, $Y_1 = Y_2 = 6{,}85$, $X_3 = 12{,}95$, $X_1 = X_2 = 12{,}42$.

Здесь эмоциональные взаимодействия потенциально повышают как интеллектуальную, так и деловую деятельность до уровня, который выше, чем при автономной деятельности.

Ввиду симметрии взаимодействия и внутренних симметрий личностей получены одинаковые большие значения для интеллектуальных концептов взаимодействия, чем для остальных концептов.

Ситуация 2. В этой ситуации подключены все три типа взаимодействия. Достигается максимальный эффект взаимодействия личностей: показатели их концептов имеют максимальное значение: $Y_1 = Y_2 = Y_3 = 20$, $X_1 = X_2 = X_3 = 30$.

Это означает, что две личности планируют работать над проектом с максимальной отдачей. Максимальная коллективная работоспособность достигается благодаря гармоничному взаимодействию двух гармоничных личностей.

Ситуация 3. Рассмотрим влияние внутренних «конфликтных» ситуаций у личностей на производительность труда.

Внутренний конфликт у НС (Y) между эмоциями, трудом и интеллектом ($K_{23} = K_{13} = -0{,}4$). Тогда получаем:

$$\begin{cases} Y_1 = 1{,}43,\ Y_2 = 1{,}43,\ Y_3 = 3{,}36, \\ X_1 = 12{,}03,\ X_2 = 12{,}03,\ X_3 = 12{,}16. \end{cases}$$

Это значит, что работоспособность личности Y низко упала, а личность X остается на уровне максимальной автономной работоспособности, но значительно ниже коллективной.

Личностный «конфликт» у обеих личностей X и Y ($K_{23} = K_{13} = -0{,}4$ и $K_{23} = K_{13} = -0{,}45$). При этом получаются самые низкие показатели:

$$\begin{cases} Y_1 = 0{,}64,\ Y_2 = 0{,}64,\ Y_3 = 1{,}68, \\ X_1 = 0{,}56,\ X_2 = 0{,}56,\ X_3 = 1{,}68. \end{cases}$$

Вывод: обе личности в этой ситуации не работоспособны и, следовательно, допускать конфликты как внутри личности, так и между личностями недопустимо.

Следует отметить, что при общении двух личностей возможно еще множество различных ситуаций: когда одна личность работает с полной отдачей, а вторая – лишь помогает ей, либо работает с неполной отдачей. В любом из этих случаев конечный результат все равно будет ниже, чем в ситуации 2, когда обе гармоничные личности при полной координации работают с полной отдачей.

Таким образом, результаты моделирования общения двух личностей показывают их потенциальные возможности при выполнении научного проекта и правильно отражают основные положения современной психологии общения, учитывая ее коммуникативные, интерактивные и перцептивные стороны общения.

Понятие *структура личности* рассмотрено с системных позиций, включая интеллектуальную и организационную деятельность, а также психологическую составляющую. Это понятие отражает личность как активный элемент системы. Предложены когнитивные модели, отражающие структуру личности и структуру общения двух личностей на трех уровнях, которые достаточ-

но полно отражают современные представления личности как о социальном объекте. Полученные модели в дальнейшем используются при когнитивном анализе свойств структуры личности и особенностей взаимодействия двух личностей.

Предложенная модель общения двух личностей при выполнении научного проекта отражает основные положения современной психологии общения, учитывая ее коммуникативные, интерактивные и перцептивные стороны общения.

Установлено, что при взаимодействии двух личностей максимальный эффект взаимодействия может быть достигнут:

при гармонической настройке каждой личности;

при симметричном положительном взаимодействии обеих личностей.

Выявлено, что наличие у личности любого внутреннего «конфликта» приводит к резкому понижению эффективности работы над проектом, т. к. «расстроенная» личность не в состоянии достичь максимальной производительности труда.

Минимальный эффект от деятельности над проектом получается, когда обе личности находятся в «конфликте» с собой и друг с другом одновременно.

Данные выводы могут быть восприняты как рекомендации при управлении малыми научными группами или другими рабочими коллективами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гузаиров, М.Б.** Системный подход к анализу сложных систем и процессов на основе триад [Текст]/ М.Б. Гузаиров, Б.Г. Ильясов, И.Б. Герасимова//Проблемы управления.–2007.–№ 5.–С. 32–38.

2. **Ковалев, А.Г.** Психология личности [Текст]/ А.Г. Ковалев.–М., 1970.

3. Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций [Текст]/(CASC'2009): Тр. Междунар. конф. 17-19 ноября 2009.–М.: ИПУ РАН, 2009.–288 с.

4. **Леонтьев, А.Н.** Деятельность, сознание, личность [Текст]/А.Н. Леонтьев.–М., 1975.

5. Психология управления персоналом: Пособие для специалистов, работающих с персоналом [Текст]/ Под ред. А.В. Батаршева, А.О. Лукьянова; 2-е изд., испр.–М.: Психотерапия, 2007.–624 с.

6. **Рубинштейн, С.Л.** Основы общей психологии [Текст]/С.Л. Рубинштейн.–М.: 1989.

УДК 004.414.2

А.В. Кудаков

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ

Современные требования обеспечения высокого качества учебного процесса диктуют необходимость своевременной и объективной оценки уровня знаний обучаемых или уровня их компетенции. Это, в свою очередь, актуализирует проблему применения технических средств автоматизации данного процесса и анализа полученных результатов [1]. Контроль, являясь формой обратной связи в системе управления образованием, позволяет оперативно выявлять отклонение образовательного процесса от нормы и на этой основе вырабатывать корректирующие и предупреждающие мероприятия в деятельности образовательного учреждения и всех участников образовательного процесса.

Идея компьютерного тестирования напрямую проистекает от идеи автоматизированного контроля знаний. Одна из проблем любого образования – отсутствие строгого контроля за качеством усвоения материала. В системе высшего образования преподаватель в течение семестра начитывает материал, осуществляет промежуточный контроль, но, в большинстве случаев, лишь в конце семестра убеждается в уровне усвоения материала. Подразумевается, что студенты должны в достаточной степени заниматься и самостоятельным образованием, однако это предполагаемое самостоятельное получение знаний остается целиком и полностью на совести студента, и преподаватель

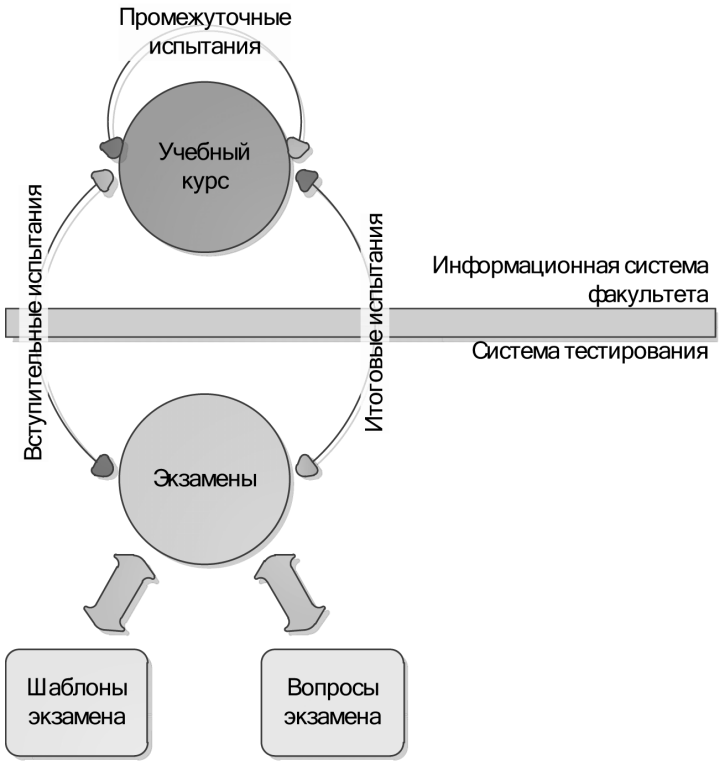


Рис. 1. Предметная область

абсолютно не может знать, кто именно из студентов хоть что-то делает самостоятельно [2].

Применение технических средств автоматизации образовательной деятельности способствует уменьшению воздействия означенной выше проблемы. Это касается, прежде всего, применения регулярного промежуточного контроля степени усвоения учебного материала и контроля самостоятельной работы студентов.

Несмотря на широкое распространение автоматизированных систем интеллектуального тестирования знаний, проблема адекватной оценки результатов тестирования остается все еще до конца не решенной, о чем свидетельствует большое количество методов и алгоритмов, используемых в данной области [3].

Для решения означенных проблем на факультете переподготовки специалистов (ФПС) СПбГПУ более 10 лет используется и развивается система автоматизации контроля знаний студентов и слушателей, являющаяся частью информационной системы факультета [4].

Логическая архитектура системы

Рассмотрим объекты предметной области, с которыми взаимодействует система.

Понятие «Экзамен» (или «Тест») – ключевое в системе тестирования. На рис. 1 представлены его связи с другими объектами предметной области.

Экзамен. Экзамен характеризуется следующими свойствами. Свойство *активность* экзамена означает, что экзамен находится в эксплуатации, т. е. не устарел и не отменен.

Очевидно, что экзамен нельзя удалить из системы, т. к. в этом случае будет утеряна история и произойдет потеря связности данных. Вместе с тем, также очевидно, что с течением времени экзамен может устареть и потерять актуальность. В этом случае экзамен может быть деактивирован, это не позволит использовать его при назначении новых экзаменационных сеансов для кандидатов.

У экзамена есть код и наименование. Код может быть использован для классификации экзаменов по каким-то признакам: вступительный, промежуточный, итоговый, остаточные знания и пр. У экзамена также предусмотрены такие свойства, как описание, предварительные требования и примечания.

Являясь частью информационной системы факультета, эти свойства используются ее различными компонентами. Кроме того, есть служебные свойства, такие, как автор и дата создания, редактор и дата изменения.

Упомянутый выше код экзамена может быть использован для учета и отображения «версии» экзамена. Это актуально в том случае, когда название экзамена сохранилось, а содержание изменилось.

Шаблон Экзамен. Следующий важный объект предметной области – шаблон *экзамен*, определяющий свойства, правила и условия проведения экзамена. У экзамена может быть несколько шаблонов, позволяющих решать различные задачи.

К примеру, экзамен может быть вступительным по одному предмету и итоговым по другому. При этом с помощью шаблонов можно ужесточать или смягчать требования и определять какие-то другие условия.

Шаблон характеризуется наименованием, описанием и свойством активности. Свойства, определенные в шаблоне, используются на уровнях представления, бизнес-логики и рабочих процессов для решения определенных задач. Свойства разделены на несколько категорий.

К категории свойств шаблона *Сессия* относятся такие параметры, как «разрешить удаленный доступ», «режим обучения», «длительность», «число попыток». Все эти параметры определяют свойства экзаменационного сеанса. Длительность задает срок, в течение которого кандидат должен сдать экзамен. Например, это может быть два дня или одна неделя. В этот промежуток времени кандидат может предпринять одну или несколько попыток сдать экзамен. Количество таких попыток определено параметром «число попыток». Режим обучения предусматривает возможность сразу в ходе выполнения экзамена отображать правильный результат выполнения вопроса (или задания) и комментировать, почему именно такой ответ является правильным. С возможными ссылками на литературу, Интернет или конспект лекций.

Система тестирования предусматривает, что экзамен можно сдавать как в пределах локальной сети учебного заведения, так и находясь вне его стен (параметр «разрешить удаленный доступ»). Очевидно, что в последнем случае невозможно предсказать, кто в действительности проходит экзамен. Поэтому шаблон, в котором такое свойство установлено, может быть в дальнейшем использован при анализе и обработке результатов экзаменов.

К категории свойств шаблон *Попытка* относятся такие параметры, как «длительность», «интервал между попытками», «число вопросов», «проходной балл», «только вперед».

Перед тем как кандидат сможет приступить непосредственно к процедуре экзамена (в терминах системы «попытка»), необходимо определить «длительность» попытки (например, один час) и число вопросов (тестовых заданий) на которые предстоит ответить учащемуся.

Экзамен может и должен содержать значительное число тестовых заданий. Причем в литературе отмечается, что это число должно в 3–4 раза превышать число вопросов, выпадающих испытуемому.

Если сеанс предусматривает возможность предпринять несколько попыток сдать экзамен, то параметр «интервал между попытками» определяет, как скоро он сможет это сделать. В противном случае, особенно, если преподаватель разрешил большее число попыток, испытуемый сможет предпринять их одна за другой вместо того, чтобы обдумать и проанализировать результаты и попытаться ликвидировать пробелы в имеющихся знаниях. «Проходной балл» определяет в процентном отношении (или по 100-балльной шкале) сдан или не сдан экзамен.

Некоторые тестовые системы предусматривают возможность привязки шкалы оценок к полученному результату. При таком подходе есть как преимущества, так и недостатки.

Безусловно, с психологической точки зрения, испытуемому приятно увидеть истинное выражение набранного балла в виде вербальной оценки «удовлетворительно», «хорошо». Но, вместе с тем, это может превратить экзаменационную систему в бездушный автомат. К примеру, реализована фиксированная шкала оценок: 3–60 %, 4–70 %, 5–80 %. Испытуемый набрал 68,70 %. Какая у него оценка: «удовлетворительно» или «хорошо»? Значит, необходимо использовать интервальную шкалу оценок, к примеру: «удовлетворительно» = [58…69], «хорошо» = [67…79], «отлично» = [77…100].

Но, в этом случае, не понятно как разрешить конфликты в перекрывающихся пограничных областях.

Поэтому решение использовать двоичную градацию «сдал/не сдал» представляется простым и эффективным, а саму процедуру определения оценки желательно оставить за экзаменатором. К тому же оценка, особенно итоговая, может складываться из нескольких факторов, а не только, и

не сколько из результатов электронного экзамена.

Параметр «только вперед» позволяет реализовать однозначно линейное прохождение экзамена: от текущего вопроса к следующему без возможности вернуться назад к предыдущему и исправить ответ. Вместе с контролем времени, которое отводится на каждый вопрос (тестовое задание) в отдельности, это позволит ужесточить условия проведения экзамена. Ко всему прочему, в случае проведения экзамена очно (особенно, массово, одновременно у всех студентов группы) или дистанционно, испытуемые могут обмениваться информацией друг с другом. Несмотря на стремление иметь достаточно большую выборку вопросов, это требование может не соблюдаться, в результате чего у некоторых испытуемых некоторые вопросы могут совпадать. А в результате обмена информацией и возможности вернуться к произвольному заданию и исправить ответ, у них будут совпадать и ответы, что, несомненно, снизит качество проведения испытаний.

К категории свойств шаблона *Результат* относятся такие параметры, как «показывать результат», «показывать сдал/не сдал», «показывать набранный балл», «показывать проходной балл», «показать по категориям», «разрешить просмотреть результаты», «сохранить наименьший балл».

Эта категория свойств Шаблона определяет, каким образом испытуемый информируется о завершении экзамена.

Например, он может быть уведомлен, что экзамен завершен, и на этом – всё. Вместе с тем, система может оповестить испытуемого о том, что он сдал или не сдал, какое число баллов набрал, какое число баллов требовалось набрать.

По окончании экзамена испытуемому в течение какого-то времени может быть разрешено посмотреть на то, как он отвечал на вопросы теста. Это время и определяется параметром «длительность просмотра».

Система может пропускать вопросы (задания), на которые испытуемый успешно ответил. Кроме того, система может визуально отображать, какие варианты ответов на задания являются правильными, объяснять почему именно такой ответ является правильным. Иными словами, в систему заложены не только функции тестирования знаний, но и обучающие функции.

Безусловно, здесь есть и отрицательный момент, связанный со списыванием вопросов, правильных ответов и объяснений, но технически противостоять этому невозможно, в этом случае требуется целый комплекс организационных мероприятий, присутствие ментора (наблюдателя) и пр.

Именно поэтому, как показывает практический опыт эксплуатации системы, в шаблонах, которые разрешены для удаленного тестирования, просмотр результатов запрещен.

Тестовое задание. Следующим важным объектом предметной области является понятие «Вопрос» (или тестовое задание). Вопрос характеризуется текстом задания и флагом активности. Только активные вопросы (т. е. не устаревшие) могут попадать в новые выборы вопросов при назначении новых сеансов.

В ходе эксплуатации экзамена какие-то решения могут устаревать или терять актуальность. Автор экзамена или лицо, сопровождающее экзамен, может «отключать» такие вопросы. Вместе с тем, в системе тестирования разработан и реализован механизм подсчета «Рейтинга» вопроса. Под рейтингом здесь понимается сложность вопроса, представленная числом 0..1 и полученная на основе статистической обработки результатов. Чем ближе это число к нулю, тем «сложнее» задание и наоборот, чем ближе к единице, тем «проще».

С точки зрения оценки знаний, в экзамене не должно быть чрезмерно простых и чрезмерно сложных заданий. Поэтому система в режиме редактирования вопроса визуально отображает его рейтинг.

Кроме того, специальный отчет отображает все вопросы экзамена и их рейтинги. Процедура отключения вне-рейтинговых вопросов может быть реализована следующим образом. После того как для экзамена будет определен минимальный и максимальный рейтинг, специальный агент, выполняясь по расписанию, будет отключать плохие вопросы, уведомляя при этом автора экзамена (или лицо, ответственное за экзамен).

Вопрос может быть связан с определенной категорией (или темой). Это позволит реализовать следующие задачи:

1. После завершения теста отображать статистику по каждой из категорий, тем самым информируя как испытуемого, так и преподавателя о некоторых пробелах в знаниях по определенным темам учебного курса. Что, в свою очередь, мо-

жет означать, что либо у испытуемого проблемы с усвоением материала данной темы, либо у преподавателя проблемы с изложением данной темы.

2. Желательно (или нет) в ходе случайной генерации выборки вопросов (тестовых заданий), чтобы они равномерно распределились по каждой из представленных тем.

3. Категории (теме вопроса) может быть задана весовая характеристика, что может быть учтено в ходе подсчета результатов тестирования.

У вопроса может быть «объяснение», в котором составитель вопроса может разъяснить, как правильно ответить на вопрос, привести необходимые ссылки на конспект лекции, литературы, Интернет и пр.

Вопросу с помощью нечетких переменных может быть задан вес в диапазоне от «очень легкий» до «нормальный» и далее до «очень сложный».

Весовая характеристика используется при подсчете результатов тестирования.

Кроме того, у вопроса есть свойство «перемешивать варианты ответов». Это нужно для того, чтобы у двух соседних испытуемых, даже в случае отображения одного и того же тестового задания, варианты ответов в нем отличались. Это позволит избежать бессмысленного выучивания ответов по их фиксированному местоположению.

Вариант ответа на тестовое задание содержит текст варианта ответа и признак, определяющий, что этот вариант ответа правильный.

Система контролирует действия составителя вопросов экзамена, уведомляя о том, что ни один из «правильных» вариантов ответов не определен.

Кроме того, система вычисляет рейтинг варианта ответа, который имеет тот же смысл, что и рейтинг вопроса. В какой-то степени это частотная характеристика: как часто выбирают тот или иной, правильный или неправильный вариант ответа.

Предметом дальнейших исследований является использование данного рейтинга при обработке результатов экзамена и влияние этого рейтинга на конечный балл результата.

Вместе с тем, изменение варианта ответа или, тем более, добавление нового варианта, ведет к искажению вопроса, а, стало быть, экзаменов, проведенных в предыдущий период времени. Агент системы должен отслеживать такие изменения, создавать дубликат вопроса и деактивировать предыдущий вариант (или версию) вопроса.

Кроме упомянутых объектов предметной области следует упомянуть, что система обладает функционалом миграции экзамена из предыдущей версии системы тестирования (1996–2007 гг.).

Это позволило быстро и безболезненно перенести более шестидесяти экзаменов, разработанных в предыдущие годы.

В системе также реализованы функции импорта и экспорта экзамена в файл в формате XML. Правильнее сказать, что для этой цели был разработан расширенный формат XML. Для экспорта и импорта данных для других переносимых форматов, таких как SCORM, для системы могут быть реализованы и подключены дополнительные модули.

Сеанс и попытка. Следующие понятия предметной области – «Сеанс» (или «Сессия») и «Попытка».

Сеанс характеризуется следующими параметрами: «GUID» (уникальный код), «дата начала», «дата окончания» (срок), «испытуемый», «шаблон», «число попыток» и «пароль».

Попытка характеризуется параметрами: «GUID» (уникальный код), «сеанс», «дата начала», «срок окончания», «текущий вопрос», «последняя активность», «дата завершения», «набранный балл», «проходной балл», «дата начала просмотра», «дата окончания просмотра», «пароль для просмотра».

Эти объекты имеют отношение к понятию «Экзамен» и окружающей его инфраструктуре и непосредственно связаны с проведением процедуры тестирования, что схематично изображено на рис. 2.

Экзаменатор назначает испытуемому экзаменационную сессию (или сеанс) на основе выбранного шаблона экзамена, в котором определены специфичные правила проведения экзамена.

Сессия, помимо уникального служебного кода, характеризуется датой начала и датой окончания. Это позволяет экзаменатору запланировать экзамен на какую-то дату и время в будущем и определить срок ее окончания (рис. 3).

Испытуемый может сам определить время, когда ему будет «удобно» начать новую попытку. Параметр «интервал между попытками» определен в шаблоне экзамена. До тех пор, пока этот интервал не пройдет, новую попытку начинать нельзя.

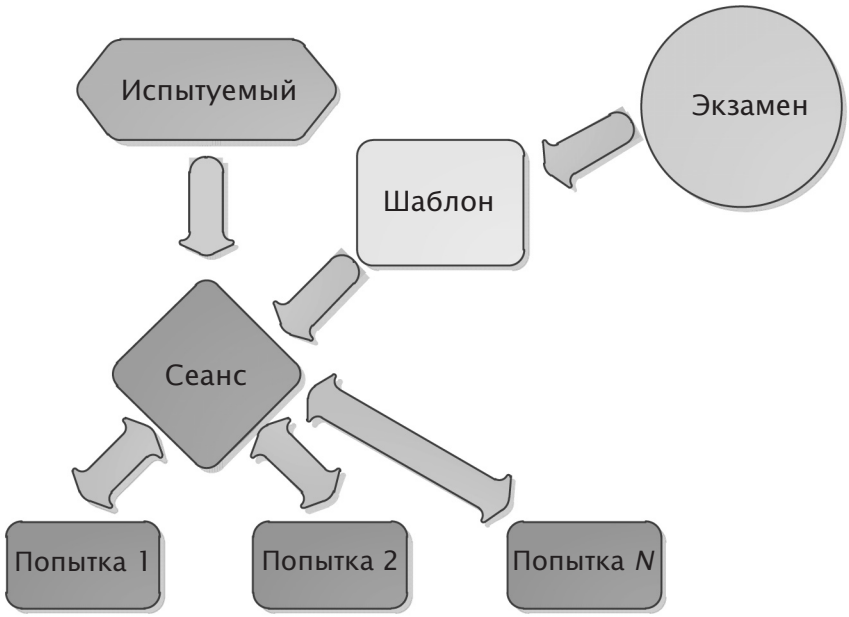


Рис. 2. Логическое взаимодействие объектов системы

Длительность самой попытки, как сказано выше, определена в шаблоне экзамена, на основе которого и создается новый сеанс. Это максимально допустимое время, т. к. ничто не мешает испытуемому досрочно завершить экзамен.

Физическая архитектура системы

С точки зрения физической архитектуры приложение состоит из двух компонент: сервера баз данных и web-сервера.

Для хранения данных используется одна и та же физическая база данных, что и для комплексной системы автоматизации учебного процесса на ФПС СПбГПУ. Иными словами, система тестирования является не обособленным приложением, а частью информационной системы факультета. Уполномоченные преподаватели и сотрудники деканата могут назначать экзаменационные сеансы, а затем получать информацию о результатах, полученных студентами. В результате можно не только получить информацию о студентах, учебных планах по которым они учатся, но и историю их обучения и экзаменов.

Важные аспекты системы – вопросы защиты данных от несанкционированного доступа.

В системе реализована комплексная модель защиты информации на всех уровнях многоуровневой архитектуры распределенного приложения.

Прежде всего, система использует аутентификацию и авторизацию, поддерживаемую на уровне операционной системы Microsoft Windows и ее сетевой инфраструктуры.

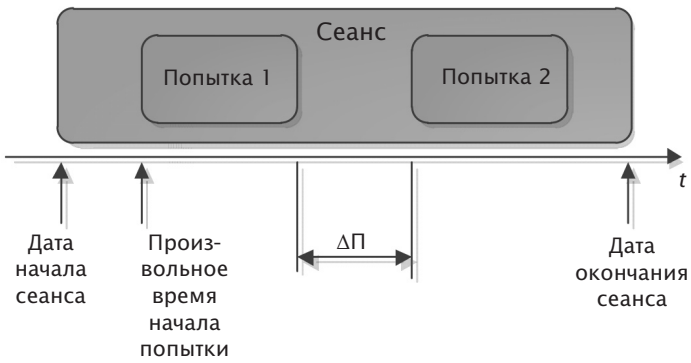


Рис. 3. Сеансы и попытки

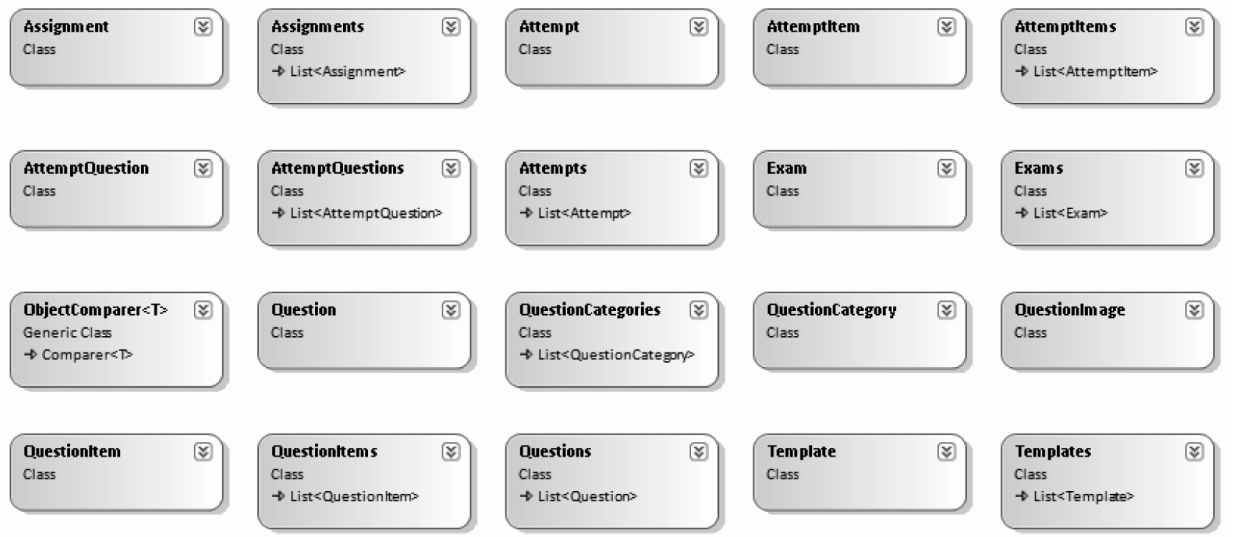


Рис. 4. Схема классов библиотеки предметной области

Обработка данных в системе тестирования реализована в виде сохраненных процедур и функций. В свою очередь, пользователям даны разрешения на выполнение тех или иных процедур и функций. При этом реализована методика ролевого подхода по организации доступа к обработке данных.

Все пользователи системы тестирования могут играть одну или несколько ролей:

кандидаты – пользователи, которые могут сдавать экзамены и однократно просматривать результаты своего экзамена;

аудиторы результатов – пользователи, которые могут просматривать результаты всех экзаменов и получать по ним статистику;

экзаменаторы – пользователи, которые могут назначать и изменять экзаменационные сеансы как отдельным кандидатам, так и группам кандидатов;

авторы экзаменов – пользователи, которым разрешено создавать новые и редактировать существующие экзамены, вопросы экзаменов, шаблоны, получать информацию о статистике экзамена и пр;

администраторы – пользователи, которые могут делать все вышеперечисленное.

Библиотека уровня доступа к объектам предметной области позволяет осуществлять контроль доступа при выполнении каждого конкретного метода. В результате многоуровневой защиты пользователю будет запрещено выполнение несанкционированного действия еще до того момента, когда команда на исполнение такого метода действительно поступит в сервер баз данных.

С учетом упомянутого выше и выполняемого web-сервером контроля доступа к отдельным логическим разделам приложения, можно уверенно говорить о реализации многоуровневой защиты данной распределенной информационной системы.

Уровень доступа к данным реализован в виде библиотеки классов на языке C# с применением технологий ADO.NET и XSD (XML Data Sets).

Уровень доступа к объектам предметной области также реализован в виде библиотеки классов, схема которых представлена на рис. 4

Реализованная система может найти применение для автоматизации оценки уровня компетенций студентов вузов и учащихся школ. Она интенсивно используется преподавательским составом ФПС и насчитывает более 150 тестов. После ввода в эксплуатацию осенью 2007 г. второго поколения системы, в ней хранятся результаты более 13 500 экзаменов, которые сдавали около 4000 учащихся. Система зарекомендовала себя как функциональная, доступная, надежная и простая в использовании.

Модульная архитектура системы позволяет непрерывно наращивать ее функциональные возможности. Компоненты, необходимость которых появляется в ходе эксплуатации системы, могут быть спроектированы, реализованы и подключены к системе без внесения каких-либо изменений в ее ядро.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Садовничий, В.А.** Компьютерная система проверки знаний учащихся [Текст]/В.А. Садовничий//Высшее образование в России.–1994.–№3.–С. 20–26.

2. Менеджмент качества в образовательных учреждениях: в 2 кн [Текст].–СПб.: СПбГЭТУ, 2003.

3. **Моисеев, В.Б.** Информационный подход к выбору решений в системах адаптивного тестирования [Текст]/В.Б. Моисеев, Л.Г. Пятирублевый, К.Р. Таранцева//Матер. конф. Анализ качества образования и тестирование.–22.03.2001.–М.: МО РФ. МЭСИ. –С. 174–1.

4. **Кудаков, А.В.** Система тестирования уровня знаний: итоги эксплуатации и перспективы развития [Текст]/А.В. Кудаков//Матер. конф. Образование и виртуальность ВИРТ-2007.–17–21. 09. 2007.–Ялта.

НАУЧНЫЙ СЕМИНАР ФТК
17 сентября 2010 г.

Представляем аннотацию доклада доцента А.Е. Васильева и старшего преподавателя М.М. Шилова на научном семинаре факультета технической кибернетики.

А.Е. Васильев, М.М. Шилов

О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНОЙ ГРУППЫ «ВСТРАИВАЕМЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ» (ВИСУ)

В докладе рассмотрена проблема алгоритмического обеспечения систем управления, предназначенного для реализации на вычислительных платформах встраиваемых микроконтроллерных средств. Область их применения включает сферы промышленности, телекоммуникаций, медицинской аппаратуры и др. К особенностям, характеризующим их применение, относятся требования минимизации значений стоимостных и массогабаритных показателей, обеспечение высокой надежности, дешевизны и пригодности для массового тиражирования; удовлетворение этих требований косвенно влияет на ограничения по вычислительной производительности платформы. Рост требований к качеству управления и потребность в управлении объектами высокой степени сложности приводят к необходимости применения специальных методов синтеза и реализации алгоритмического обеспечения для этого класса средств вычислительной техники.

Описана иерархическая организация уровней управления; наибольшее внимание уделено подсистемам нечеткой обработки информации, позволяющим реализовать алгоритмы, характеризующиеся минимальными требованиями к вычислительным ресурсам, что предоставляет возможность достичь большего качества и сложности управления на данной вычислительной платформе или реализовать систему с заданными характеристиками на платформе меньшей сложности.

Важный аспект деятельности научной группы – внедрение достигнутых теоретических и практических результатов в учебный процесс: в лаборатории встраиваемых интеллектуальных систем управления факультета технической кибернетики ведется подготовка студентов по направлению «Управление и информатика в технических системах». Проблема реализации интеллектуальных подсистем рассматривается на примерах предметной области автоматики и робототехники – в учебном процессе решаются задачи обработки информации в системах технического зрения, управления локомоциями робототехнических манипуляторов, навигации в среде с препятствиями, управления колебательными процессами и др. Существенное внимание уделено лабораторной базе – создано специальное лабораторное оборудование, натурные стенды и исследовательское программное обеспечение.

Актуальный научный аспект деятельности группы – разрабатываемый подход к синтезу систем нечеткой обработки информации с применением сетей элементарных вычислителей нечетких логических функций, что позволит улучшить качество и снизить трудоемкость проектирования встраиваемых систем, и повысить качество их функционирования. Рассмотрен также практический аспект аппаратной реализации нечетких вычислителей такого рода.

Эффективность деятельности коллектива группы ВИСУ подтверждается результативностью участия в различных конкурсах: к настоящему моменту завоевано пять золотых и серебряных медалей международных выставок «Высокие технологии, инновации, инвестиции» различных лет, восемь медалей Всероссийского конкурса студенческих научных работ, получено две субсидии Комитета по науке и высшей школе правительства Санкт-Петербурга по поддержке научной и научно-технической деятельности, два гранта Конкурса молодых научно-педагогических работников, десять студенческих грантов конкурсного Центра фундаментального естествознания Санкт-Петербурга, звание лауреата конкурса «Студент года СПбГПУ» и другие награды.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АКЧУРИН Адель Джавидович – *заведующий кафедрой радиоастрономии Казанского федерального университета, кандидат физико-математических наук.*

420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18. Тел. (843) 233-71-96

АЛТЫНБАЕВ Равиль Биктимурович – *аспирант кафедры систем автоматизации производства Оренбургского государственного университета.*

462000, Оренбургская область, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13. Тел. (3532) 37-25-12

АНИКИН Игорь Вячеславович – *заведующий кафедрой систем информационной безопасности Казанского государственного технического университета имени А.Н. Туполева, доцент, кандидат технических наук, докторант.*

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10. Тел. (843) 231-00-56, e-mail: anikinigor@evm.kstu-kai.ru

БЕЛОВ Вячеслав Вячеславович – *профессор кафедры строительных конструкций и материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

БЛАГОВ Дмитрий Сергеевич – *ассистент кафедры радиоэлектронных средств защиты информации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

БЛЕКАНОВ Иван Станиславович – *ассистент кафедры технологии программирования Санкт-Петербургского государственного университета, аспирант.*

198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., д. 35. E-mail: a_vanes@mail.ru

БОЛДЫРЕВ Юрий Яковлевич – *заведующий кафедрой математического и программного обеспечения высокопроизводительных вычислений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: boldyrev@phmf.spbstu.ru

БОНДАРЕВА Ирина Олеговна – *ассистент кафедры прикладной информатики в экономике Астраханского государственного технического университета, кандидат технических наук.*

414025, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16. Тел. (8512) 61-45-08

БОНДАРЕНКО Дмитрий Сергеевич – *выпускник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ВАСИЛЬЕВА Татьяна Павловна – *аспирант кафедры прикладной математики и информатики Пермского государственного университета*.

614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15. E-mail: vasilyeva_09@mail.ru

ВОЛВЕНКО Сергей Валентинович – *доцент кафедры радиоэлектронных средств защиты информации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ГАЗИМОВА Диана Рафиковна – *ассистент, магистрант кафедры систем информационной безопасности КГТУ имени А.Н. Туполева.*

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10. Тел. (843) 231-00-56, e-mail: diana_sirius@mail.ru

ГЕЛЬГОР Александр Леонидович – *ассистент кафедры радиоэлектронных средств защиты информации Санкт-Петербургского политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ГЕРАСИМОВА Ильмира Барыевна – *доцент кафедры автоматизированных систем управления Уфимского государственного авиационного технического университета, кандидат технических наук, докторант.*

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 273-78-23, e-mail: tarot_gera@mail.ru

ГЕТМАН Александр Николаевич – *начальник Южного таможенного управления, генерал-майор таможенной службы.*

344002, г. Ростов-на-Дону, Буденовский пр., д. 20. Тел. (863) 240-24-64

ЖУРАВЛЕВА Любовь Михайловна – *доцент кафедры радиотехники и электросвязи Московского государственного университета путей сообщения.*

127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. Тел. (495) 684-24-39

ЗИНОВЬЕВ Игорь Павлович – *ассистент кафедры систем информационной безопасности Казанского государственного технического университета имени А.Н. Туполева.*

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10. Тел. (843) 231-00-56, e-mail: izinoviev@mail.ru

ИВАНОВ Михаил Викторович – *инженер группы сквозной оптимизации СЗФ ОАО «Мегафон».*

191011, Санкт-Петербург, ул. Караванная, д. 10. E-mail: ivanov.mvi@megafonnw.ru

КАТАСЁВ Алексей Сергеевич – *доцент, докторант кафедры систем информационной безопасности КГТУ имени А.Н. Туполева, кандидат технических наук.*

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10. Тел. (843) 231-00-56, e-mail: Kat_726@mail.ru

КЛИМШИН Дмитрий Валерьевич – *начальник технического отдела научно-учебного центра делового сотрудничества Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

КУБАЕВ Вячеслав Андреевич – *соискатель механико-математического факультета МГУ имени Ломоносова.*

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1. Тел. (495)939-12-44

КУДАКОВ Александр Владимирович – *заместитель директора Института государственного управления и информатизации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Обручевых, д. 1, ком. 202. Тел. (812) 703-02-02, e-mail: Alexander.Kudakov@spbstu.ru

КУДРЯВЦЕВ Олег Евгеньевич – *доцент кафедры информатики и информационных таможенных технологий Ростовского филиала Российской таможенной академии, кандидат физико-математических наук.*

344002, г. Ростов-на-Дону, Буденовский пр., д. 20. Тел. (863) 262-59-59, e-mail: koe@donrta.ru

КУЗНЕЦОВ Дмитрий Андреевич – *аспирант кафедры системного анализа в проектировании и управлении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21

КУЛЕШОВ Игорь Александрович – *заместитель начальника научно-исследовательского центра, доцент Военной академии связи имени С.М. Буденного, кандидат военных наук.*

194064, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., д. 3.

МАКАРОВ Дмитрий Анатольевич – *аспирант кафедры систем информационной безопасности КГТУ имени А.Н. Туполева.*

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10. Тел. (843) 231-00-56, e-mail: to.dime@gmail.com, dime.makarov@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. 29

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, факс (8112) 16-00-39, e-mail: matveev176@rambler.ru

МЫЗНИКОВА Бэла Исаковна – *доцент кафедры информационных систем и математических методов в экономике Пермского государственного университета, кандидат физико-математических наук.*

614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15. E-mail: vasilyeva_09@mail.ru

ОСТАНИН Сергей Александрович – *докторант кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета, кандидат физико-математических наук.*

656000, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 61. Тел. (385) 236-70-59, e-mail ostanin1963@mail.ru

ПОБЕДАШ Павел Николаевич – *докторант кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета.*

660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», д. 31. Тел. (3912) 91-91-41, e-mail: pobed_pnp@mail.ru

ПОТАПОВ Алексей Сергеевич – *аспирант кафедры систем информационной безопасности Казанского государственного технического университета имени А.Н. Туполева.*

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10. E-mail: madcent@gmail.com

ПОПОВ Евгений Александрович – *доцент кафедры радиоэлектронных средств защиты информации Санкт-Петербургского политехнического университета, кандидат технический наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ПОПОВ Сергей Геннадьевич – *старший преподаватель кафедры интегрированных компьютерных технологий в промышленности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812)-552-77-65, e-mail: popovserge@gmail.com

ПРОКОШЕВ Валерий Григорьевич – *заместитель заведующего кафедрой физики и прикладной математики Владимирского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.*

600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87. Тел. (4922) 33-33-69, e-mail: laser@vlsu.ru

РОЖКОВ Максим Михайлович – *ассистент кафедры физики и прикладной математики Владимирского государственного университета.*

600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87. Тел. (4922) 33-33-69, e-mail: mgetty@list.ru

РОЗАНОВ Артем Евгеньевич – *инженер ОАО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем».*

111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а. Тел. (495) 957-77-10, e-mail: o_v_ch@mail.ru

РОМАНОВ Сергей Васильевич – *начальник управления стратегического планирования и развития Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

РОСТОВ Николай Васильевич – *кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

РЯБЧЕНКО Сергей Васильевич − *преподаватель кафедры узлов связи Военной академии связи имени С.М. Буденного.*

194064, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., д. 3

САЛАНГИН Алексей Александрович – *доцент кафедры физики Псковского государственного политехнического института, кандидат технических наук.*

180000, г. Псков, ул. Л. Толстого, д. 4. Тел. (8112) 79-78-78, e-mail: alsalan@yandex.ru

СЕМЁНОВ Георгий Александрович – *аспирант кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета.*

656000, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 61. Тел. (385) 236-70-59

СТРЕЛЕЦ Ксения Игоревна – *старший преподаватель кафедры технологии организации и экономики строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

СТРЕЛКОВА Елена Валентиновна – *заместитель директора Фундаментальной библиотеки Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-76-54, (812) 552-76-59, e-mail: sev@unilib.neva.ru

СО Ирина Александровна – *аспирант кафедры информационных измерительных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ТАЗЕТДИНОВ Андрей Дамирович − *директор Центра информационных технологий АНО ВПО «Международный банковский институт» Санкт-Петербург, кандидат технических наук.*

191023, Санкт-Петербург, Невский пр., д. 60. Тел. (812) 570-55-52, e-mail: 191_nkp@bk.ru

ФОРТИНСКИЙ Андрей Георгиевич − *преподаватель кафедры узлов связи Военной академии связи имени С.М. Буденного.*

194064, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., д. 3

ХАНОВА Анна Алексеевна − *докторант кафедры прикладной информатики в экономике Астраханского государственного технического университета, кандидат технических наук, доцент.*

414025, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16. Тел. (8512) 61-45-08, e-mail akhanova@mail.ru

ХИБАТУЛЛИН Салават Гайфуллович – *соискатель кафедры систем автоматизации производства Оренбургского государственного университета.*

462000, Оренбургская область, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13. Тел. (3532) 37-25-12

ЧЕРНОЯРОВ Олег Вячеславович – *доцент кафедры радиотехнических систем Московского технического университета связи и информатики, кандидат физико-математических наук.*

111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а. Тел. (495) 957-77-10, e-mail: o_v_ch@mail.ru

ШАЙДУК Александр Михайлович – *профессор кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета, доктор физико-математических наук.*

656000, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 61. Тел. (385) 236-70-59

ШАЛАЕВСКИЙ Олег Николаевич – *аспирант кафедры информационных измерительных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ШАМИН Павел Юрьевич – *доцент кафедры физики и прикладной математики Владимирского государственного университета, кандидат технических наук.*

600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87. Тел. (4922) 33-33-69, e-mail: trace83@mail.ru

ШАНИНА Александра Сергеевна – *ведущий программист технического отдела научно-учебного центра делового сотрудничества Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ШЕВЦОВ Юрий Дмитриевич – *профессор кафедры информатики Кубанского государственного технологического университета.*

350000, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135. Тел. (861) 259-60-83, e-mail: emessage@rambler.ru

ШМАРИН Игорь Александрович – *аспирант кафедры организации и управления производством Балтийского государственного технического университета «Военмех» имени Д.Ф. Устинова.*

190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1. E-mail: kd-group@yandex.ru

ЮСУПОВ Камиль Маратович – *аспирант кафедры радиоастрономии Казанского федерального университета.*

420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18. Тел. (843) 233-71-96

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Благов Д.С., Волвенко С.В. ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В МЕТЕОРНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ.

Дана оценка выигрыша во времени доставки при фиксированной вероятности доставки для случая использования переменной длительности сигналов по сравнению с постоянной. Получены зависимости объема передаваемой информации от интенсивности появления метеорных следов для постоянной и переменной длительностей сигналов.

МЕТЕОРНАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПЕРЕМЕННАЯ СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.

Прокошев В.Г., Рожков М.М., Шамин П.Ю. ПРОБЛЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ С ОДНИМ ЭТАЛОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЕМ.

Рассмотрена оригинальная методика распознавания людей по изображению лица в ситуации с одним эталонным изображением. Проведено её сравнение с рядом известных методик других авторов.

БИОМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ. РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИЦ. 2D-РАСПОЗНАВАНИЕ. ПРОБЛЕМА ОДНОГО ЭТАЛОНА. ПРИНЦИП «БЛИЖАЙШЕГО ЭЛЕМЕНТА».

Блеканов И.С., Бондаренко Д.С. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПОИСКА ТЕМАТИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ В ВЕБ-ПРОСТРАНСТВЕ.

Описано и проведено сравнение трех методов поиска тематических сообществ в Веб-пространстве: метода, использующего информацию только о тексте документа при помощи TF-IDF взвешивания; метода, использующего информацию о гиперссылочной структуре документов при помощи алгоритма HITS; метода, основанного на совместном использовании алгоритма HITS и взвешивания TF-IDF. Рассмотрены принципы функционирования сфокусированных Веб-краулеров, алгоритмы обхода Веб-пространства которых основаны на данных методах. Поставлен эксперимент, в котором оценивается качество поиска информации каждого Веб-краулера в английских и русских коллекциях и выявляется наиболее эффективный.

ОБХОД ВЕБ-ГРАФА. ВЕБ-КРАУЛЕР. ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЕБ-КРАУЛЕР. АЛГОРИТМ КЛЕИНБЕРГА HITS. TF-IDF ВЗВЕШИВАНИЕ. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА В ИНФОРМАЦИОННОМ ПОИСКЕ. ЭКСПЕРИМЕНТ.

Гельгор А.Л., Попов Е.А. ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ОГИБАЮЩЕЙ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПИК-ФАКТОР И КОЭФФИЦИЕНТ КОРРЕЛЯЦИИ.

Решена задача оптимизации формы огибающей многокомпонентных сигналов при наличии ограничений на пик-фактор и корреляцию. Предложен численный метод решения, основанный на представлении огибающей в виде ортогонального разложения. Получены решения для большого числа компонент и различных значений пик-фактора и корреляции.

МЕЖСИМВОЛЬНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ. ПИК-ФАКТОР. КОРРЕЛЯЦИЯ. РЯД ФУРЬЕ.

Иванов М.В. АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ПОМЕХ В ОБРАТНОМ КАНАЛЕ В СЕТЯХ WCDMA И МЕТОДЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ.

Рассмотрены источники интерференции в обратном канале для сетей сотовой связи с кодовым разделением каналов. Описано влияние интерференции на качество обслуживания абонентов. Приведен пример увеличения интерференции вследствие некорректной конфигурации хэндоверов. Предложен метод удаленного поиска неописанных хэндоверов в сети WCDMA.

СЕТИ СВЯЗИ С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ. ХЭНДОВЕР. КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Останин С.А., Шайдук А.М., Семёнов Г.А. ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ МАЛОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ.

Приведены аналитические оценки параметров сигналов, при которых возможно обнаружение короткого периодического сигнала, скрытого в шуме, спектральным методом. Описаны результаты численного моделирования спектрального обнаружителя коротких периодичностей в сравнении с оконным спектрально-статистическим методом обнаружения короткой периодичности.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ. СКРЫТАЯ ПЕРИОДИЧНОСТЬ. ОКОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД. УПОРЯДОЧЕННОСТЬ В ШУМЕ.

Чернояров О.В., Розанов А.Е. КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА И ДИСПЕРСИИ СЛУЧАЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА С ПРОИЗВОЛЬНОЙ МОДУЛИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИЕЙ.

Выполнен синтез и анализ квазиоптимального алгоритма оценки времени прихода и дисперсии высокочастотного гауссовского случайного импульсного сигнала с произвольной модулирующей функцией на фоне белого шума. Методами статистического моделирования определена эффективность предложенного измерителя и установлены границы применимости асимптотически точных формул для его характеристик.

СЛУЧАЙНЫЙ ГАУССОВСКИЙ ИМПУЛЬС. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА. МЕТОД МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ. МЕТОД ЛОКАЛЬНО-МАРКОВСКОЙ АППРОКСИМАЦИИ. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭВМ.

Акчурин А.Д., Юсупов К.М. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИОНОЗОНДА «ЦИКЛОН».

Описана организация системы управления ионозонда «Циклон», позволяющая повысить точность определения действующей высоты (до ~500 м). Система управления состоит из двух плат: промышленной платы начального освоения (с размещенной СБИС ПЛ) и разработанной авторами дополнительной платы. Такое сочетание двух плат позволяет быстро создать простую и недорогую систему управления, подключаемую к шине PCI, имеющую привязку к шкале времени с тактированием всех частотно-зависимых узлов от одного опорного генератора.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ИОНОЗОНД. ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ИС. VERILOG HDL. ШИНА PCI.

Матвеев В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНУСНОЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ В МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ.

Рассмотрена линейно-квадратичная динамическая многокритериальная задача и определено уточненное по конусу решение. На основе метода динамического программирования Беллмана представлены достаточные условия существования такого решения.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА. ОПТИМАЛЬНОСТЬ ПО КОНУСУ. ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ.

Тазетдинов А.Д. О НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОНИМАНИЯ ИНФОРМАЦИИ.

Рассмотрена и исследована математическая модель процесса понимания информации, основанная на теоретико-множественном подходе, а также модель такого концептуального термина, как «понятие». Предложены способы оптимизации и управления информацией для лучшего ее понимания.

УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИЕЙ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ. ОПТИМИЗАЦИЯ. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ.

Шмарин И.А. ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ РАЗВИТИЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.

Рассмотрены теоретические и практические основы реализации устойчивого развития на уровне предприятия. Изложен механизм принятия системных управленческих решений на основе применения информационных технологий.

УПРАВЛЕНИЕ. УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СОБСТВЕННОСТЬ.

Победаш П.Н. АНАЛИЗ МОДЕЛИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННОГО ПОДХОДА.

На основе операторного подхода получены оценки оптимального значения свертки критериев в модели оптимального управления реальными инвестициями с неопределенным спросом с двумя участниками – производителем и налоговым центром. Данный подход позволяет оценивать эффективность инновационного проекта на этапе его предварительного анализа и доказывать теоремы существования решения в соответствующих многошаговых задачах оптимального управления.

ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ПРОЕКТ. МНОГОШАГОВАЯ ЗАДАЧА ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ.

Кулешов И.А., Фортинский А.Г., Рябченко С.В. К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ СТРУКТУР УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ.

Дана классификация систем управления сложной организационно-технической системой. Классификация проведена на основе уровней, принципов и функций управления.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. СИСТЕМА СВЯЗИ. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.

Ростов Н.В. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ МОДАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ПРЯМОГО И КОСВЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.

Сформулирована задача многокритериальной параметрической оптимизации цифровых модальных регуляторов с наблюдателем. Изложена методика оптимизации таких регуляторов по векторным критериям различного вида на основе зондирования, совмещенного с алгебраическим синтезом, анализом устойчивости и моделированием динамики цифровой САУ в узлах. Приведены примеры поиска Парето-оптимальных настроек параметров регулятора по результатам зондирования.

ЦИФРОВЫЕ МОДАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ. АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ. ПРЯМОЕ И КОСВЕННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ.

Салангин А.А. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ.

Предложена методология системного проектирования технических систем. Рассмотрены проблемы, возникающие при постановке и решении задач системного проектирования, предложены подходы к разрешению этих проблем.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ. СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. МЕТОДОЛОГИЯ.

Попов С.Г. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕПОЗИТОРИЯ СХЕМ РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗ ДАННЫХ.

Предложена методика построения подсистемы интеграции независимых баз данных на основе репозитория схем. Изложенный метод позволяет обеспечить оптимальность репозитория относительно времени доступа и объема данных.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ. ОПТИМИЗАЦИЯ. РЕПОЗИТОРИЙ. СХЕМА. МЕТОДИКА.

Аникин И.В., Потапов А.С. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРОДУКЦИОННО-ФРЕЙМОВОЙ МОДЕЛИ.

Предложена продукционно-фреймовая модель для формализации знаний эксперта о решении задачи оценки рисков информационной безопасности. Данная модель позволяет учесть нечеткие знания экспертов путем определения слотов фреймов в виде лингвистических переменных. Разработан программный комплекс в виде экспертной системы оценки рисков информационной безопасности.

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ОЦЕНКА РИСКОВ. ПРОДУКЦИОННО-ФРЕЙМОВАЯ МОДЕЛЬ. ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА.

Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Романов С.В., Шанина А.С. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.

Приведены результаты анализа расчета осадки сваи в сложных геологических условиях с учетом нелинейного поведения грунтов. Продемонстрирован расчет напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов совместно со свайным основанием под трамплинами многофункционального спортивного комплекса. Показана возможность решения данной проблемы на основе тех же технологий, что и при моделировании работы отдельной сваи. Показана важность учета взаимного влияния двух трамплинов друг на друга, нелинейного поведения грунтов, а также грунтовых вод. Рассмотрено взаимодействие конструкций трамплинов и грунтового массива под ними.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. МЕХАНИКА ГРУНТОВ. ДРУКЕР-ПРАГЕР. СВАЙНОЕ ОСНОВАНИЕ. ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ. НЕЛИНЕЙНОЕ ПОВЕДЕНИЕ.

Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Романов С.В. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УНИКАЛЬНЫЕ ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Приведены результаты применения технологий вычислительной аэродинамики при расчете лыжных трамплинов спортивного комплекса. Представлены результаты моделирования движения воздушных потоков в масштабе всего спортивного комплекса, определены аэродинамические коэффициенты ветрового давления на поверхности сооружений, а также проведен анализ взаимного влияния двух близкостоящих высотных зданий при расчете ветрового воздействия на сооружения.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ВЫСОТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ. АЭРОДИНАМИКА. ВЕТРОВОЕ ДАВЛЕНИЕ.

Гетман А.Н., Кудрявцев О.Е. ОЦЕНКА ФИНАНСОВОГО РИСКА ПОЛУЧЕНИЯ ТАМОЖЕННЫХ ПЛАТЕЖЕЙ.

Разработана методика анализа финансовых рисков, связанных с таможенной деятельностью. Предложен алгоритм оценки финансового риска получения таможенных платежей ниже планового задания, который интерпретируется как «риск разорения». Алгоритм основывается на оценке функции распределения индекса таможенных платежей.

ФИНАНСОВЫЙ РИСК. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РИСКОВ. РИСК КАК ВЕРОЯТНОСТЬ. ТАМОЖЕННЫЕ ПЛАТЕЖИ. ПЛАНОВОЕ ЗАДАНИЕ.

Ханова А.А., Бондарева И.О. СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ КАЧЕСТВА ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ.

Описана имитационная модель грузового порта. Сформулирована система показателей качества логистического обслуживания грузового порта и алгоритм формирования управленческих решений. Проведен полнофакторный эксперимент и выявлена оптимальная комбинация факторов. Обоснована эффективность предложенных решений.

КАЧЕСТВО ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ. СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА.

Алтынбаев Р.Б., Хибатуллин С.Г. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ РАБОТ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЩЕСТВ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.

Рассмотрен научно-обоснованный метод расчета времени выполнения отдельных элементов полета воздушных судов при проведении авиационного распределения веществ и биологических объектов в сельском хозяйстве с учетом влияния ветра.

МЕТОДИКА. МОДЕЛИРОВАНИЕ. АВИАЦИОННЫЕ РАБОТЫ. СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ САМОЛЕТЫ.

Катасёв А.С., Газимова Д.Р. МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В ПАРТНЕРСКИХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМАХ.

Предложена инвариантная нечетко-продукционная модель, позволяющая производить описание закономерностей предметной области на множестве разнотипных данных. Описан алгоритм логического вывода на данной модели. На примере решения задачи определения кредитоспособности физических лиц приведены результаты оценки ее эффективности.

РАЗНОТИПНЫЕ ПАРАМЕТРЫ. МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ. ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.

Зиновьев И.П., Аникин И.В. МОДЕЛЬ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ.

Предложена новая модель логического вывода на основе правил ЕСЛИ-ТО и нечеткой линейной регрессии. Сформулирована и доказана теорема об аппроксимации. Описан алгоритм построения продукционных правил нечеткой системы для аппроксимации таблично-заданной функции. Проведено сравнение точности аппроксимации предложенной модели с системами Мамдани-типа. С помощью предложенной модели решена задача прогноза тяжести течения заболевания на основе известных данных о состоянии пациентов.

НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА. НЕЧЕТКИЕ СИСТЕМЫ. НЕЧЕТКИЙ ВЫВОД. НЕЧЕТКАЯ ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ.

Малыхина Г.Ф., Со И.А. РАЗРАБОТКА НОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЧЕЛОВЕКА.

Предложена модель цветовосприятия зрительной системой человека, построенная по экспериментальным психофизическим данным. Произведена оценка адекватности модели с помощью сопоставления погрешностей в исходных точках с методической погрешностью, рассчитанной по данным разных авторов.

ЦВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ. ПОРОГ ЦВЕТОРАЗЛИЧЕНИЯ. МОДЕЛЬ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ. ИНТЕРПОЛЯЦИЯ. АППРОКСИМАЦИЯ.

Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Шанина А.С. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.

Представлены некоторые результаты расчета уникального металлического купола диаметром 127 м, проведен выбор наилучшей конструктивной схемы, продемонстрирован расчет сложных узловых соединений в пространственной твердотельной постановке. Выявлено существование ряда ограничений и допущений, существенно влияющих на ход проектирования уникальных металлических конструкций. Продемонстрированные методики расчета позволяют учитывать реальную жесткость узловых соединений, анализировать поведение конструкции в нелинейной постановке.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ. УЗЛЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ. СХЕМА КАЙВИТА. ЖЕСТКОСТЬ УЗЛОВ.

Стрелец К.И. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ГАЗА.

Статья посвящена оценке эффективности очистки газов от частиц пыли в циклонах с использованием математических моделей движения частиц пыли в закрученном потоке газа. Предложенная математическая модель учитывает влияние турбулентных пульсаций на осаждение частиц в циклоне и основана на модели турбулентной диффузии с конечной скоростью. Предложены дифференциальные уравнения и способы их численного решения. Показаны предварительные результаты расчетов эффективности осаждения частиц

ЦИКЛОН. ОСАЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ. ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОТОК. ПУЛЬСАЦИОННАЯ СКОРОСТЬ. ТУРБУЛЕНТНАЯ ДИФФУЗИЯ.

Макаров Д.А. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ДВИЖУЩИМСЯ ОБЪЕКТОМ В СИСТЕМАХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ.

Обоснована необходимость решения задачи слежения за движущимися объектами в системах видеонаблюдения. Для этого предлагаются специально разработанные методика и алгоритмы нахождения границ контура объекта и выполнения процедуры слежения. Описан программный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы. Приведены результаты анализа их устойчивости и первичной апробации в составе системы поддержки принятия решений при видеомониторинге подвижных объектов.

ВЫДЕЛЕНИЕ РАЗМЫТЫХ КОНТУРОВ. СЛЕЖЕНИЕ ЗА ДВИЖУЩИМСЯ ОБЪЕКТОМ. СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.

Кубаев В.А. НЕСТРОГОЕ ВЛОЖЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ В ПРИЛОЖЕНИИ К ПОИСКУ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ.

Рассмотрена задача нестрогого поиска по шаблону в упорядоченных размеченных деревьях в приложении к организации семантического поиска математических выражений.

Предложен новый подход к нестрогому поиску поддеревьев, который использует набор разрешенных преобразований поддеревьев шаблонного дерева. Каждому разрешенному преобразованию присваивается некоторый вес, и ставится задача по поиску минимально возможного суммарного веса преобразований, позволяющих вложить шаблонное дерево в целевое.

ПОИСК В ДЕРЕВЕ ПО ШАБЛОНУ. СЕМАНТИЧЕСКИЙ ПОИСК. ПОИСК МАТЕМАТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ.

Мызникова Б.И., Васильева Т.П. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАДОФОРМИРОВАНИЯ: ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД.

Представлены результаты применения динамической модели типа Лоренца к изучению проблемы градоформирования. С помощью методов качественного анализа динамических систем и численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений построены бифуркационные диаграммы состояний и фазовые портреты в проекциях на плоскости переменных модели, а также указаны области значений в пространстве параметров, в которых система демонстрирует различные динамические режимы.

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ. БИФУРКАЦИОННАЯ ДИАГРАММА. РАЗВИТИЕ ГОРОДА.

Шевцов Ю.Д. К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ СМАЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЭС КАК ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.

Рассмотрены вопросы применения теории пневмо-гидравлических цепей для построения модели масляного фильтра. Полученная модель позволит учитывать особенности изменения гидравлических параметров масляного фильтра по мере его загрязнения для различных эксплуатационных режимов.

МОДЕЛЬ. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ФИЛЬТР. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ.

Кузнецов Д.А. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ, АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ.

Статья посвящена исследованию и моделированию динамических процессов в экономике с учетом иерархии и взаимного влияния параметров. Основными методами моделирования и расчета стали методы системного анализа и информационного подхода. Расчет моделей производится с помощью САПР ADS Agilent Technologies, что позволяет получать численные решения для дифференциальных уравнений высоких порядков.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД. ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЦЕПИ. МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ. ПРОГНОЗ. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.

Шалаевский О.Н., Малыхина Г.Ф. ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА БАЗЕ ОБЩИХ КРИТЕРИЕВ.

Предложен метод, позволяющий формализовать набор требований безопасности для объекта измерительных информационных технологий на основе предметной области, описанной в общих критериях (ОК). Для проверки работоспособности метода разработана библиотека классов на C++, включающая в себя необходимый инструментарий.

ОБЩИЕ КРИТЕРИИ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. ОНТОЛОГИЯ БЕЗОПАСНОСТИ.

Журавлева Л.М. ИЗОТОПТРОНИКА КАК НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ.

Рассмотрены вопросы создания новых материалов для изготовления электронных и оптоэлектронных устройств на базе квантовых структур. Предложено с помощью нейтронного облучения легировать полупроводники собственными изотопами. Такая изотопическая нанотехнология обеспечит высокое качество производства элементной базы ВОСП.

ИЗОТОПТРОНИКА. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ. НАНОТЕХНОЛОГИИ.

Стрелкова Е.В. ИДЕНТИФИКАЦИЯ АВТОРОВ И ПЕРСОНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ В ЭЛЕКТРОННО-БИБЛИОТЕЧНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены некоторые вопросы развития электронных каталогов и национальной системы авторитетных файлов в инновационной деятельности библиотек: цитируемость авторов, проект РИНЦ и альтернативная графика в библиографических записях; электронные коллекции в пространстве библиотечных ресурсов и мемориальные объекты в системе источников краеведческого характера. Изложены проблемы формирования полнотекстовых ресурсов на текущей стадии развития Интернет-пространства.

АВТОРИТЕТНЫЕ ДАННЫЕ. ИДЕНТИФИКАЦИЯ АВТОРА. ПЕРСОНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ. ЭЛЕКТРОННЫЕ КОЛЛЕКЦИИ. СЕМАНТИЧЕСКИЙ WEB.

Тазетдинов А.Д. О РЕЗУЛЬТАТАХ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА УСВОЕНИЯ ЗНАНИЙ В ЕСТЕСТВЕННО-ЯЗЫКОВОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ.

Описаны технология и результаты проверки эффективности использования математической модели усвоения знаний в рамках автоматизированной обучающей системы. Приведена статистическая оценка данных, полученных в результате эксперимента, с помощью *t*-критерия Стьюдента и критерия χ^2.

УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИЕЙ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ. ОПТИМИЗАЦИЯ. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ.

Кудаков А.В. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ.

Рассмотрена логическая и физическая архитектура автоматизированной системы контроля и оценки знаний.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ. ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ. КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА ЗНАНИЙ.

Герасимова И.Б. КОГНИТИВНЫЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОБЩЕНИЯ ДВУХ ЛИЧНОСТЕЙ.

Рассмотрена когнитивная модель структуры личности как активного элемента системы, включающая интеллектуальную и организационную деятельность, а также влияние психоэмоционального фактора. Предложена формализованная модель общения двух личностей, учитывающая коммуникативные, интерактивные и перцептивные стороны общения.

КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. СТРУКТУРА ЛИЧНОСТИ. МАЛЫЕ НАУЧНЫЕ ГРУППЫ. НАУЧНЫЙ ПРОЕКТ. ПСИХОЛОГИЯ ОБЩЕНИЯ ЛИЧНОСТЕЙ. СИСТЕМА. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД.

ANNOTATION

KEYWORDS

Blagov D.S., Volvenko S.V. INCREASE OF SPEED OF INFORMATION TRANSFER IN METEOR-BURST COMMUNICATION SYSTEMS BY USE OF SIGNALS OF VARIABLE DURATION.

Estimated advantage in delivery's time at the fixed probability of delivery in case of use variable data rates in comparison with a constant data rates is given. Dependences of the transferred data's volume from meteor burst rate for a constant and a variable data rates are presented.

METEOR-BURST COMUNICATION SYSTEM. SIMULATION. VARIABLE DATA RATE.

Prokoshev V.G., Rozkhov M.M., Shamin P.U. PROBLEM OF AUTOMATIC RECOGNITION OF PERSONS WITH ONE REFERENCE IMAGE.

In this clause a method of human recognition by face image in a "single sample per person" case are considered. The comparison with other similar methods are performed.

BIOMETRIC IDENTIFICATION. FACE RECOGNITION. 2D-RECOGNITION, "SINGLE SAMPLE PER PERSON" PROBLEM. NEAREST NEIGHBOR METHOD.

Blekanov I.S., Bondarenko D.S. THE EFFICIENCY EVALUATION OF COMMUNITIES SEARCH METHODS OF THE WEB-SPACE.

The paper presents the functional principles of operation of a focused Web-crawler, its algorithm of traversals of Web-space, based on a modified version of Kleinberg's HITS algorithm. Examples and estimations of the new Web-crawler performance over both local (within a domain) and regional (Russian) Web-spaces are given along with a detailed comparison with the standard Web-crawler results

GRAPH TRAVERSAL. WEB-CRAWLER. TOPICAL WEB-CRAWLER. KLEINBERG's HITS ALGORITHM. TF-IDF WEIGHING. QUALITY EVALUATION OF INFORMATION. EXPERIMENT.

Gelgor A.L., Popov E.A. MULTI-COMPONENT SIGNALS ENVELOP OPTIMIZATION ON PEAK-TO-AVERAGE POWER RATIO AND CORRELATION CONDITIONS.

Multi-component signals envelop optimization on peak-to-average power ratio and correlation conditions considered. Suggested computational solution utilizing envelop expansion in orthogonal series. Solutions developed for various values of components amount, peak-to-average power ratios and correlations.

INTERSYMBOL INTERFERENCE. PEAK-TO-AVERAGE POWER RATIO. CORRELATION. FOURIER SERIES.

Ivanov M.V. THE ANALYSIS OF THE REASONS OF OCCURRENCE OF INTERSYSTEM HINDRANCES IN THE RETURN CHANNEL IN NETWORKS WCDMA AND METHODS OF THEIR ELIMINATION.

In article interference sources in the UL channel for networks of cellular communication with code sharing of channels WCDMA are considered. Influence of an interference on quality of service of subscribers is described. The example of increase in an interference owing to an incorrect handovers configuration is resulted. The method of remote search undescribed handovers in network is offered.

WCDMA NETWORKS. INTERFERENCE. HANDOVER. QUALITY OF SERVICE. NETWORK OPTIMIZATION.

Ostanin S.A., Shayduk A.M. Semenov G.A. LIMITATIONS OF SPECTRAL METHODS FOR DETECTION OF SHORT PERIODIC SIGNALS.

Analytical estimations of parameters of signals at which detection of the short periodic signal hidden in noise, a spectral method is possible are resulted. Results of numerical modeling spectral detector of short periodicity in comparison with a window spectral-statistical method of detection of short periodicity are described.

SPECTRAL ANALYSIS. HIDDEN PERIODICITY. WINDOW SPECTRAL-STATISTICAL METHOD. ORDERLINESS IN NOISE.

Chernoyarov O.V., Rozanov A.E. QUASI-OPTIMAL ESTIMATIONS OF TIME DELAY AND DISPERSION OF RANDOM IMPULSE WITH ARBITRARY MODULATION FUNCTION.

The synthesis and analysis of the quasi-optimal estimation algorithm of time delay and dispersion of high-frequency random Gaussian impulse with arbitrary modulation function observed on a background of a white noise has been implemented. Functionability of offered measurer and the applicability boundaries of asymptotically exact formulas for its characteristics by statistical modeling methods have been set.

RANDOM GAUSSIAN IMPULSE. ESTIMATION OF SIGNAL PARAMETERS. MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD. METHOD OF LOCALLY-MARKOV APPROXIMATION. STATISTICAL COMPUTER MODELING OF STOCHASTIC PROCESSES.

Akchurin A.D., Usupov K.M. «CYCLON» IONOSONDE CONTROLLER.

The structure of «Cyclon» ionosonde controller is described, that allows to increase accuracy determination of virtual height (down to 500 m). Controller consists of two boards: a development (kit) board (with placed CPLD) and the additional board designed by us. Two boards allow to create fast a simple and a low cost controller connected to PCI bus with the timescale synchronized to GPS or UTC time and one reference generator to clock on the all frequency-dependent components.

IONOSONDE CONTROLLER. CPLD. VERILOG HDL. THE PCI BUS.

Matveev V.A. THE RESEARCH OF CONE OPTIMALITY IN MULTICRITERIA DYNAMICAL PROBLEM.

The linear – quadratic, dynamical problem is considered. Under the Bellman's dynamical programming the sufficient conditions for existence such decision is presented.

MULTICRITERIAL PROBLEM. CONE OPTIMALITY. DYNAMICAL PROGRAMMING.

Tazetdinov A.D. ABOUT SOME CHARACTERISTICS OF MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS OF UNDERSTANDING OF THE INFORMATION.

In the article it is considered and investigated mathematical model of process of understanding of the information, based on the theoretic-plural approach and also mathematical model of such conceptual term, as «concept». Using the presented models it's offering ways of optimization and management of the information for its best understanding.

MANAGEMENT OF THE INFORMATION. MODELLING OF PROCESSES. OPTIMIZATION. THE AUTOMATED TRAINING SYSTEMS.

Shmarin I.A. FEATURES OF MANAGEMENT OF A SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE ENTERPRISE ON THE BASIS OF INFORMATION TECHNOLOGY.

Theoretical and practical bases of realization of a sustainable development at enterprise level are considered. The mechanism of acceptance of system administrative decisions on the basis of application of information technology is stated.

MANAGEMENT. SUSTAINABLE DEVELOPMENT. INFORMATION TECHNOLOGY. INNOVATIONS. INTELLECTUAL PROPERTY.

Pobedash P.N. AN ANALYSIS OF A MODEL OF A FIRM INNOVATION DEVELOPMENT BY OPERATIONAL APPROACH.

The estimations of criteria value in a model of a firm innovation development with two economic agents under uncertainty are founded here. The approach allows to estimate the effectiveness of innovation project and to prove the theorems of decision existence in multistage multicriterial optimal control problems.

INVESTMENT PROJECT. MULTISTAGE LINEAR OPTIMAL CONTROL PROBLEM.

Kuleshov I.A., Fortinskij A.G., Rjabchenko S.V. TO A QUESTION ON CLASSIFICATION OF STRUCTURES OF MANAGEMENT BY DIFFICULT ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEM.

In article classification of control systems by difficult organizational-technical system is given. Classification is spent on a basis: levels of management, principles of management and to management functions.

SYSTEMS MANAGEMENTS. COMMUNICATION SYSTEM. STRUCTURE THE CONTROL SYSTEM. CLASSIFICATION OF CONTROL SYSTEMS.

Rostov N.V. MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF DIGITAL MODAL CONTROLLERS BASED ON DIRECT AND INDIRECT SOUNDING.

The problem of multiobjective parametrical optimization of digital modal controllers are considered. The technique for computer-aided optimization of such controllers by means of sounding are presented. Two examples are given to search Pareto-optimal tuning of parameters, using direct and indirect sounding combined with algebraic synthesis, stability analysis and dynamics simulation in nodes.

DIGITAL MODAL CONTROLLERS. ALGEBRAIC SYNTHESIS. MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION. DIRECT AND INDIRECT SOUNDING. STABILITY ANALYSIS.

Salangin A.A. FORMALIZATION OF PROBLEMS OF SYSTEM DESIGNING.

System engineering concept of technical complexes has been recommended. Matters arising at setting and solving systems engineering problems have been considered, different ways to the resolution of these problems have been offered.

SYSTEM ANALYSIS. SYSTEM ENGINEERING. METHODOLOGY.

Popov S.G. METHOD OF CONSTRUCTION OF OPTIMAL REPOSITORY OF RELATIONAL SCHEMAS DATABASES.

The paper proposed a method of constructing the subsystem integration of independent databases based repository schemes. The method enables to ensure the optimal repository on the access time and data volume.

DATABASE MANAGEMENT SYSTEM. OPTIMIZATION. REPOSITORY. SCHEMA. METHOD.

Anikin I.V., Potapov A.S. SOFTWARE-BASED COMPLEX FOR INFORMATION SECURITY RISK ASSESSMENT BASED ON FRAME-PRODUCTION KNOWLEDGE REPRESENTATION.

Frame-production expert knowledge representation is suggested for the task of information security risk assessment. This model can formalized fuzzy expert knowledge when frame slots established as linguistic variables. Software-based complex is released as expert system for information security risk assessment.

INFORMATION SECURUTY. RISK ASSESSMENT. FRAME-PRODUCTION MODEL. EXPERT SYSTEM.

Belov V.V., Boldyrev U.I., Romanov S.V., Shanina A.S. EXPERIENCE OF APPLICATION OF MATHEMATICAL SIMULATION FOR THE SOIL BASES OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

Results of pile deposits calculation analysis in difficult geological conditions with taking into account of soil nonlinear behavior are resulted. Calculation of the soil intense-deformed condition in common with the pile basis under springboards of a multipurpose sports complex is shown. Possibility of the decision of the given problem on the basis of the same technologies is shown, as at modeling of work of a separate pile. Importance of the account of mutual influence of two springboards against each other, nonlinear behavior of soils, and also ground waters is shown. Interaction of designs of springboards and a soil file under them is considered.

MATHEMATICAL SIMULATION. SOIL MECHANICS. DRUKER-PRAGER. THE PILE BASIS. MUTUAL INFLUENCE. NONLINEAR BEHAVIOR. WIND PRESSURE.

Belov V.V., Boldyrev U.I., Klimshin D.V., Romanov S.V. MODERN TECHNOLOGIES OF MATHEMATICAL SIMULATION AT CALCULATIONS OF WIND INFLUENCE ON UNIQUE BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.

Results of application of technologies of computing aerodynamics are resulted at calculation of ski jumping hills of a sports complex. Results of modeling of movement of air streams on the scale of all sports complex are presented, aerodynamic factors of wind pressure upon surfaces of constructions are defined, and also the analysis of mutual influence of two close standing high-rise buildings is carried out at calculation of wind influence on constructions.

MATHEMATICAL SIMULATION. HIGH-RISE CONSTRUCTIONS. AERODYNAMIC FACTORS. AERODYNAMICS. WIND PRESSURE.

Getman A.N., Kudryavtsev O.E. THE ESTIMATION FOR THE FINANCIAL RISK OF OBTAINING CUSTOMS PAYMENTS BELOW THE PLAN LEVEL.

In the paper, the method of analysis of the financial risk connected with the customs activity is developed. We suggest the estimation algorithm of the financial risk of obtaining customs payments below the plan level which is interpreted as “default risk”. The algorithm is based on the estimation for the cumulative function of the customs payment index.

FINANCIAL RISK. METHODS FOR RISK ESTIMATION. RISK AS PROBABILITY. CUSTOMS PAYMENTS. PLAN LEVEL.

Khanova A.A., Bondareva I.O. SCENARIO APPROACH TO THE ANALYSIS OF QUALITY OF LOGISTIC SERVICE OF THE ENTERPRISE WITH USE OF IMITATING MODEL (ON AN EXAMPLE OF SCENARIO APPROACH)

In clause problems of theoretical representation of questions of stability of management are considered by telecommunication systems. The basic problems with reference to modern telecommunication systems are stated.

QUALITY OF LOGISTIC SERVICE. SCENARIO APPROACH. MODELLING. EXPERIMENT PLANING.

Altynbaev R.B., Khibatullin S.G. ACCURACY INCREASE OF CALCULATIONS THE TIME OF PERFORMANCE OF AERIAL WORK ON DISTRIBUTION OF SUBSTANCES AND BIOLOGICAL OBJECTS

The scientifically method of time calculation of performance of separate elements of aircraft flights is considered during carrying out of aerial spreading of substances in agriculture taking the wind into account.

METHOD. MODELING. AERIAL WORK. AGRICULTURAL AVIATION.

Katasev A.S., Gazimova D.R. THE KNOWLEDGE REPRESENTATION MODEL IN PARTNER EXPERT SYSTEMS.

In this paper for effectiveness increase expert systems using in different fields the necessity of new knowledge representation model development is being updated. The logical inference algorithm on this model is been described. On the sample of the natural persons credit capacity task solution the results of her performance evaluation are been described.

MULTI-TYPE PARAMETERS. KNOWLEDGE REPRESENTATION MODEL. EXPERT SYSTEM. DECISION MAKING.

Zinovyev I.P., Anikin I.V. LOGICAL INFERENCE MODEL BASED ON FUZZY LINEAR REGRESSION.

A new fuzzy inference approach based on IF-THEN rules and fuzzy linear regression is proposed. Approximation theorem concerning this model is formulated and proofed. An outline of producing fuzzy rules that approximate given table-based function is described. Results of experiments comparing proposed approach with Mamdani-type systems are given. Practical task of prognosis for a disease based on patient's state that solved by proposed fuzzy system is described.

FUZZY SETS. FUZZY SYSTEMS. FUZZY INFERENCE. FUZZY LINEAR REGRESSION.

Malichina G.F., So I.A. CREATING NEW COLOR PERCEPTUAL MODELS OF HUMAN VISUAL SYSTEM AND THEIR COLLATION.

The color perception model of human visual system has been proposed. The model is based on experimental psychophysical data. Adequacy of the model has been evaluated by comparing errors of interpolation and approximation with methodical error of data obtained by different authors.

COLOR MEASUREMENT. COLOR THRESHOLD. HUMAN VISUAL SYSTEM. INTERPOLATION. APPROXIMATION.

Belov V.V., Boldyrev U.I., Klimshin D.V., Shanina A.S. MODERN TECHNOLOGIES OF MATHEMATICAL SIMULATION OF WIDE-SPAN METAL CONSTRUCTIONS.

Some results of calculation of a unique metal dome in diameter of 127 meters are presented, the choice of the best constructive scheme is spent, calculation of difficult central connections in spatial solid-state statement is shown. Existence of some restrictions and the assumptions essentially influencing a course of designing of unique metal designs is revealed. The shown design procedures allow to consider real rigidity of central connections, to analyze behavior of a design in nonlinear statement.

MATHEMATICAL SIMULATION. WIDE-SPAN METAL CONSTRUCTIONS. KNOTS OF METAL DESIGNS. THE SCHEME OF KAJVITA. RIGIDITY OF KNOTS.

Strelets K.I. COMPUTATIONAL SOLUTION OF THE DIFFERENTIAL EQUATIONS TURBULENT DIFFUSION IN CENTRIFUGAL GAS FLOW.

The work is devoted to the estimation of the efficiency of gas purification from the dust particles in the cyclones, using mathematic models of the motion of solid particles suspended in turbulent flow. Presented model take account the influent of turbulent shear flow to the process of particles sedimentation. The model is based on the model of turbulent diffusion with the limited velocity. There are the preliminary results of estimation the efficiency of particles sedimentation shown.

CYCLONE. PARTICLE SEDIMENTATION. TURBULENT FLOW. PULSATION OF THE VELOCITY. TURBULENT DIFFUSION.

Makarov D.A. DEVELOPMENT AND APPLICATION OF ALGORITHMS OF TRACKING MOVING OBJECT IN VIDEO OBSERVATION SYSTEMS.

In this paper the necessity of solving the task of following the moving objects in video surveillance systems is being updated. For this purpose are suggested specially developed method and algorithms of defining the outlines' borders of the object and of following procedure fulfillment. The bundled software, which puts into effect the suggested algorithms, is being described. The results of the analysis of their stability and primary approbation as part of the decision making system support during video monitoring of mobile objects are given.

FUZZY EDGE ENHANCEMENT. FOLLOWING THE MOVING OBJECTS. VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS. DECISION MAKING.

Kubaev V.A. APPROXIMATE EMBEDDING TREES IN APPLICATION TO SEARCH MATHEMATICAL EXPRESSION

The artcle deals with the approximate pattern searching in ordered labelled trees in application to semantic searching of mathematical expressions.

We introduce a new approach to approximate searching in trees which uses set of allowed subtree transformations for target tree. Each allowed transformation is assigned with some weight and the problem is to find the minimal total weight of transformations which allow to match pattern tree with the target.

TREE PATTERN MATCHING. SEMANTIC SEARCHING. SEARCHING OF MATHEMATICAL EXPRESSIONS.

Myznikova B.I., Vasilyeva T.P. URBAN DEVELOPMENT MODELLING: DETERMINISTIC APPROACH.

In this paper, theoretical results of city growing dynamics are presented based on the Lorenz-type mathematical model. The bifurcation diagram and phase-plane portraits are obtained by means of qualitative analysis and numerical simulatuion of ODE system. The ranges of parameter values are specified where the system demonstrates different dynamic regimes.

DYNAMIC SYSTEM. QUALITATIVE ANALYSIS. NUMERICAL SIMULATION. BIFURCATION DIAGRAM. URBAN GROWTH.

Shevtsov U.D. TO A QUESTION OF MODELING OF ELEMENTS OF SYSTEMS OF GREASING OF ENGINES DES AS LINEAR ELECTRIC CHAINS.

In article questions of application of the theory of pneumo-hydraulic chains for construction of model of the oil filter are considered. The received model will allow to consider features of change of hydraulic parameters of the oil filter in process of its pollution for various operational modes.

MODEL. TRANSFER FUNCTION. FREQUENCY CHARACTERISTICS. THE FILTER. ELECTRIC CHAIN.

Kuznecov D.A. AUTOMATION OF FORECASTING OF DEVELOPMENT, THE ANALYSIS AND ESTIMATION OF DYNAMIC MODELS OF SYSTEMS.

Publication is devoted to researching and modeling of dynamic processes in economics, taking into account hierarchy and interference of entire parameters in model. Methods of the systems analysis and the informational approach became the cores simulation and calculation methods. In sort of the big complexity of calculations, calculations for model are made by means of CAD ADS Agilent Technologies that allows to receive numerical solutions for the high-level differential equations.

AUTOMATIC INFORMATIONAL SYSTEM. DYNAMIC MODEL. INFORMATIONAL APPROACH. INFORMATIONAL MODELING. INFORMATIONAL NETWORKS. MODELS OF DEVELOPMENT. ORGANIZATION. PROGNOSIS. SYSTEM ANALYSIS.

Shalaevsky O.N., Malykhina G.F. ONTOLOGICAL MODEL FOR SECURITY OF INFORMATION-MEASURING TECHNOLOGIES BASED ON THE COMMON CRITERIA.

Method for formalization of a set of information-measuring security requirements, which is based on the common criteria (CC). The C++ class library was developed for usability testing of the directed model.

COMMON CRITERIA. INFORMATION-MEASURING SYSTEMS.SECURITY OF INFORMATIONAL TECHNOLOGIES. ONTOLOGY OF SECURITY.C++ CLASS LIBRARY.

Zhuravleva L.M. IZOTOPTRONICS AS A NEW DIRECTION OF NANOTECHNOLOGIES FOR CREATION ELECTRONIC AND OPTOELECTRONICS DEVICES.

Questions of creation of new materials for manufacturing electronic and optoelectronics devices on the basis of quantum structures are considered. It is offered to alloy by means of a neutron irradiation semiconductors own isotopes. Such isotopic nanotechnology will provide high quality of manufacture of element base VOSP.

IZOTOPTRONICS. OPTOELECTRONICS DEVICES. NANOTECHNOLOGY.

Strelkova E.V. IDENTIFICATION OF AUTHORS AND PERSONAL DATA IN ELECTRONIC LIBRARY SYSTEMS.

The article is dedicated to certain issues of development of electronic library indexes and the national system of authority files within the innovation activity of libraries: the citation rate of authors, Russian Scientific Citation Index and alternative graphics for bibliographic notes; institutional repository for the scope of library resources and memorial objects in the system of regional natural history sources. The issues of arranging full-text sources at the current stage of cyberspace development are set forth.

AUTHORITY DATA. IDENTIFICATION OF AUTHORS. PERSONAL DATA. PERSONALLY IDENTIFIABLE INFORMATION. INSTITUTIONAL REPOSITORY. SEMANTIC WEB.

Tazetdinov A.D. ABOUT RESULTS OF APPLICATION OF MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS OF MASTERING OF KNOWLEDGE IN NATURAL LANGUAGE TRAINING SYSTEM.

The technology and results of checking of efficiency using of mathematical model of mastering of knowledge within the automated training system are described in the article. The statistical estimation of the data received as a result of experiment by means of t-criterion of Stjudenta and criterion of χ^2 are resulted.

MANAGEMENT OF THE INFORMATION. MODELLING OF PROCESSES. OPTIMIZATION. THE AUTOMATED TRAINING SYSTEMS.

Kudakov A.V. AUTOMATED SYSTEM OF KNOWLEDGE CONTROL.

This paper discusses logical and physical architecture of an automated system of knowledge control.

THE AUTOMATED SYSTEMS. LEARNING SYSTEMS. CONTROL AND ESTIMATION OF KNOWLEDGE.

Gerasimova I.B. COGNITIVE MODELS OF COMMUNICATION PROCESSES BETWEEN OF TWO PERSONS.

We consider the cognitive model of personality structure as an active element of the scientific educational system, including the intellectual and organizational activities, as well as the influence of emotional factors. A formalized model of communication processes between of two persons, taking into account the communicative, interactive and perceptual aspects of communication, is suggested.

COGNITIVE MODEL. MODELLING. STRUCTURE OF THE PERSON. SMALL SCIENTIFIC GROUPS. THE SCIENTIFIC PROJECT. PSYCHOLOGY OF DIALOGUE OF PERSONS. SYSTEM. THE SYSTEM APPROACH.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 5 (108) 2010

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
М.О. Давыденко – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции 552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 27.10.2010. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 27,9. Уч.-изд. л. 27,9. 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.