

**ВЕСТНИК**  
**САРАТОВСКОГО**  
**ГОСУДАРСТВЕННОГО**  
**ТЕХНИЧЕСКОГО**  
**УНИВЕРСИТЕТА**  
**2010**

**№ 4 (50)**  
**Выпуск 2**

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Ноябрь 2010 г.

*Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых журналов и научных изданий, утвержденный президиумом ВАК Министерства образования и науки РФ, в которых публикуются основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук*

**Главный редактор** д.и.н., профессор И.Р. Плеве  
**Зам. главного редактора** д.т.н., профессор А.А. Сытник  
**Ответственный секретарь** д.т.н., профессор А.А. Игнатьев

**Редакционный совет:** д.э.н. **В.Р. Атоян**, д.т.н. В.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков, д.и.н. В.А. Динес, д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатьев, д.т.н. В.В. Калашников, д.т.н. И.А. Новаков, д.и.н. И.Р. Плеве (председатель), д.т.н. А.Ф. Резчиков, д.социол.н. С.Б. Суровов, д.т.н. А.А. Сытник (заместитель председателя), д.ф.-м.н. Ян Аврейцевич (Польша), д.э.н. Улли Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Энтони Мерсер (Великобритания), д.э.н. Э.де Соузе Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов

**Редакционная коллегия:** д.т.н. К.П. Андрейченко, д.т.н. Ю.С. Архангельский, д.филос.н. А.С. Борщов, д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. Ю.Г. Иващенко, д.т.н. Ю.Н. Климочкин, д.т.н. В.А. Коломейцев, д.т.н. А.В. Королев, д.т.н. В.А. Крысько, д.и.н. Г.В. Лобачева, д.т.н. В.И. Лысак, д.т.н. В.Н. Лясников, д.т.н. А.И. Финаенов, д.т.н. М.А. Щербаков.

Редактор Л.А. Скворцова  
Компьютерная верстка С.В. Пчелинцевой  
Перевод на английский язык Ю.С. Ольховцевой

Адрес редакции:  
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77  
Телефон: (845 2) 99 86 38  
E-mail: vestnik @ sstu. ru  
<http://dni. sstu. ru/vestnik.nsf>  
Факс: (845 2) 52 53 02

Подписано в печать 15.11.10  
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.  
Усл. печ. л. 25,5 Уч.-изд. л. 11, 0  
Тираж 500 экз. Заказ 464  
Отпечатано в Издательстве СГТУ,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

**Подписной индекс 18378**  
(каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2011 г.)

**VESTNIK  
SARATOV  
STATE  
TECHNICAL  
UNIVERSITY  
2010**

**№ 4 (50)  
Edition 2**

Scientific Journal

Since 2003  
Once in a quarter  
November 2010

*This journal is included into the list of leading reviewed journals and scientific publications approved by the presidium of Ministry of Education and Sciences of Russian Federation where major scientific results for academic degree competition for a doctor and a candidate of sciences*

<b>Editor-in-chief</b>	Doctor of Historical Sciences, Pr. I.R. Plevе
<b>Editor-in-chief assistant</b>	Doctor of Technical Sciences, Pr. A.A. Sytnik
<b>Executive secretary</b>	Doctor of Technical Sciences, Pr. A.A. Ignatyev

**Drafting committee:** Pr. V.R. Atoyаn, Pr. V.I. Volchihin, Pr. V.A. Golenkov, Pr. V.A. Dines, Pr. V. Zelensky (Poland), Pr. V.A. Ignatyev, Pr. V.V. Kalashnikov, Pr. I.A. Novakov, Pr. I.R. Plevе (Chairman), Pr. A.F. Rezhnikov, Pr. A.A. Sytnik (Vice of the Chairman), Pr. S.B. Surovov, Pr. Yan Avreytsevich (Poland), Pr. Ulli Arnold (Germany), Pr. Anthony Merser (UK), Pr. E. D'Sousa Ferreira (Portugal), Pr. T. Chermak (Chezh Republic), Pr. Y.V. Shlenov

**Editorial board:** Pr. K.P. Andreychenko, Pr. Y.S. Arkhangelsky, Pr. A.S. Borshov, Pr. A.S. Denisov, Pr. Y.G. Ivashenko, Pr. Y.N. Klimochkin, Pr. V.A. Kolomeitsev, Pr. A.V. Korolyov, Pr. V.A. Krysko, Pr. G.V. Lobatcheva, Pr. V.I. Lysak, Pr. V.N. Lyasnikov, Pr. A.I. Finaenov, Pr. M.A. Sherbakov

Editor L.A. Skvortsova  
Computer-based page-proof S.V. Pchelintseva  
Rendering Yu. S. Olkhovtseva

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street  
Saratov, 410054  
Russia  
Telephone: +8 (8452) 99 86 38  
E-mail: vestnik @ sstu. ru  
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>  
Fax: +8452/52-53-02

Signed for publishing: 15.11.10  
Format 60×84 1/8 Paper offset.  
Apr. tp. l. 25,5 Acc.-pbl. l. 11, 0  
Edition 500 psc. Order 464  
Printed in Publishers of SSTU,  
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

## СОДЕРЖАНИЕ

**ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

<b>Моисеев А.С., Светлов М.С.</b> Исследование помехозащищенности телевизионного тракта цифрового телевидения стандарта DVB-T .....	7
<b>Геранин Р.В., Киселёв В.В., Львов А.А., Руденко А.Е., Светлов М.С.</b> Классификация и оценивание помех при использовании QAM сигналов .....	10
<b>Киселёв В.В., Львов А.А., Руденко А.Е., Светлов М.С., Мухамбетжанов А.С.</b> Мониторинг каналов в системах с OFDM/QAM сигналами .....	13
<b>Шевченко А.А., Львов А.А., Гуреев В.В., Пыльский В.А.</b> Применение формирователя сигнала параметрических датчиков «токовая петля» для измерения температуры .....	17
<b>Светлов М.С., Попов М.А.</b> Оценка характеристик канала передачи для одночастотной сети .....	20

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ**

<b>Майстренко А.В., Майстренко Н.В.</b> Автоматизированное проектирование принципиальных технологических схем гибких ХТС в условиях неопределенности .....	23
<b>Никишин В.Б., Шорин В.С., Лисицкий Д.Л.</b> Алгоритмы системы ориентации и навигации транспортных роботов .....	30
<b>Проталинский И.О., Щербатов И.А.</b> Исследование эффективности группового управления роботами методом имитационного моделирования .....	34
<b>Проталинский О.М., Щербатов И.А., Беляев И.О.</b> Гибридный метод обучения нейронных сетей для классификации каталитической стадии процесса Клауса .....	38
<b>Большаков А.А., Лисицкий Д.Л.</b> Один подход к управлению мобильным роботом .....	43
<b>Соломенкова О.Б., Павленко И.М.</b> Характеристики комбинированного ветроколеса .....	49
<b>Алешкин В.В., Пылаев Ю.К., Матвеев А.С.</b> Первичная обработка информации избыточного блока четырех волоконно-оптических гироскопов .....	51
<b>Алешкин В.В., Голованов П.Н.</b> Оценка влияния погрешностей датчиков на точность комплексной системы ориентации и навигации на грубых инерциальных датчиках .....	58
<b>Бровкова М.Б., Свиридов С.В., Сидоров Н.С.</b> Концепция математического моделирования функционирования технологических машин .....	65
<b>Мирошниченко А.Ю., Сотников В.В.</b> Специфика использования микроконтроллеров в составе распределенных информационно-измерительных систем .....	70
<b>Аветисян Ю.А., Домнич В.С., Петров Д.Ю.</b> Причинно-следственный подход для системного анализа производства листового стекла .....	75
<b>Крайнов О.А., Петров Д.Ю., Король П.А.</b> Модели анализа качества стекольной шихты на основе искусственных нейронных сетей .....	79
<b>Коваль В.А., Торгашова О.Ю., Шворнева О.Е.</b> Система управления процессом непрерывного нагрева .....	82

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

<b>Осяев О.Г., Нейдорф Р.А.</b> Модель для анализа технического состояния многослойных несущих конструкций .....	86
<b>Богданов Л.Ю.</b> Оценка эффективности бинарных классификаторов на основе логистической регрессии методом ROC-анализа .....	92
<b>Дауров С.К., Новиков В.Ю., Александров Н.О.</b> Компьютерная обработка изображений пояснично-крестцового отдела для выделения межпозвоночных дисков .....	97

<b>Ляпина Н.С., Суятинов С.И.</b> Метод прогнозирования развития состояния человека по скрытым взаимосвязям .....	101
<b>Суятинов С.И., Торгашова О.Ю., Кириллов К.И., Пересунькина А.В.</b> Обоснование модели динамики сосудистой стенки .....	104
<b>Большаков А.А., Елисеев Д.В., Мусатов В.Ю., Сидорович О.В., Елизарова С.Ю., Королева И.В., Дружин Ю.И., Склярова Е.Ю.</b> Комбинированный метод автоматизированной диагностики заболеваний мочевыводящей системы на фоне дисплазии соединительных тканей .....	108
<b>Митрофанова Т.А., Вуйко В.В., Здражевский Р.А., Потахин С.Н.</b> Аппаратно-программный комплекс для задания пространственного положения инструментов при малоинвазивных хирургических операциях .....	112
<b>Оболонский М.О., Бровкова М.Б.</b> Методика определения вероятности устранения угрозы безопасности .....	115
<b>Большаков А.А., Булдаков Н.С.</b> Использование клеточных автоматов для обработки изображений минных полей .....	120
<b>Долинина О.Н.</b> Метод повышения эффективности обработки видеoinформации с использованием GRID -вычислений .....	125
<b>Долинина О.Н., Ермаков А.В.</b> Классификация ошибок в базах знаний экспертных систем ...	131
<b>Проталинский О.М., Ханова А.А., Бондарева И.О.</b> Имитационная модель технологических процессов грузового порта .....	134

#### УПРАВЛЕНИЕ В КЛАСТЕРНЫХ СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

<b>Гевлич И.К., Захаров А.А., Ткаченко И.М.</b> Модель системы управления развитием общеобразовательного учреждения .....	145
<b>Большаков А.А., Шатохин В.В.</b> Оценка результативности функционирования автоматизированной обучающей экспертной системы .....	149
<b>Большаков А.А., Маркелов А.Ю.</b> Контроль знаний в интеллектуальной обучающей системе по курсу «Надежность систем автоматизации» .....	153
<b>Долинина О.Н., Печенкин В.В., Тарасова В.В., Шацких П.П.</b> Модифицированный гравитационный «force-directed» метод динамической укладки социальной сети образовательной организации .....	156
<b>Большакова М.А.</b> Создание автоматизированной обучающей системы для изучения иностранного языка в неязыковых вузах .....	161
<b>Попов П.С., Мирзаянова Е.П., Ангелюк В.П.</b> Концептуальный подход в развитии колбасного производства на современном этапе .....	164
<b>Трегубов В.Н.</b> Методологические аспекты управления логистической системой городского общественного транспорта на основе концепции синхронизации .....	167
<b>Трегубов В.Н.</b> Концепция синхронизации как основа администрирования в самоорганизующихся логистических системах .....	175
<b>Квятковская И.Ю., Шуршев В.Ф., Квятковский К.И.</b> Интегрированные механизмы информационной поддержки принятия решений крупномасштабной территориально-распределенной экономической системы .....	181
<b>Краснова О.В.</b> Развитие инфраструктурных проектов с учетом отношений властных структур и бизнес-групп региона .....	190
<b>Полумордвинов О.А.</b> Организационно-экономический механизм управления инвестициями в сфере жилищного строительства .....	192
<b>Седова Я.А., Квятковская И.Ю.</b> Системный анализ корпуса текстов научного знания .....	196
<b>Сытник А.А.</b> Инновационная инфраструктура современных экономических систем .....	204
<b>Сытник А.А.</b> Причины и условия формирования национальной инновационной системы .....	209

## CONTENTS

**ELECTRONICS, RADIOENGINEERING AND INSTRUMENT MARKING**

<b>Spitsyn I.L., Baiburin V.B.</b> Research of noise immunity television tract digital tv DVB-T standard .....	7
<b>Geranin R.V., Kiselev V.V., Lvov A.A., Rudenko A.E., Svetlov M.S.</b> Interference classification and estimation in QAM signals.....	10
<b>Kiselev V.V., Lvov A.A., Rudenko A.E., Svetlov M.S., Mukhambetzhano A.S.</b> Channel monitoring in systems with OFDM/QAM signals .....	13
<b>Shevchenko A.A., L'vov A.A., Gureev V.V., Pylskiy V.A.</b> Application of the signal conditioner "current loop" for temperature measurements.....	18
<b>Svetlov M.S., Popov M.A.</b> Estimation of descriptions of channel of transmission for onefrequency network.....	21

**AUTOMATION AND MANAGEMENT**

<b>Maystrenko A.V., Maystrenko N.V.</b> Aided Design of basic technological scheme flexible CTD under conditions of uncertainty .....	23
<b>Nikishin V.B., Shorin V.S., Lisitsky D.L.</b> Algorithms for orientation and navigation systems of transport robots.....	31
<b>Protalinskiy I.O., Sherbatov I.A.</b> Investigation of the effectiveness of group management robot using simulation.....	34
<b>Protalinsky O.M., Sherbatov I.A., Belyaev I.O.</b> Hybrid method of training neural networks for classification catalytic stage of Claus process .....	38
<b>Bolshakov A.A., Lisitsky D.L.</b> One method of mobile robot motion control.....	43
<b>Solomenkova O.B., Pavlenko I.M.</b> Characteristics of the combined wind turbine.....	49
<b>Aleshkin V.V., Pylaev Y.K., Matveev A.S.</b> Initial four fiber-optic gyroscopes block information processing .....	51
<b>Aleshkin V.V., Golovanov P.N.</b> Evaluation of the influence of errors on the accuracy of sensorintegrated systems orientation and navigation on rough inertial sensors.....	59
<b>Brovkova M.B., Sviridov S.V., Sidorov N.S.</b> Concept of mathematical simulation of manufacturing equipment performance.....	65
<b>Miroshnichenko A.Y., Sotnikov V.V.</b> The feature of the microcontrollers using in the distributed information measurement systems .....	70
<b>Avetisian Yu.A., Domnich V.S., Petrov D.Yu.</b> Cause-effect method to system analysis plate glass production process .....	75
<b>Kraynov O.A., Petrov D.Yu., Korol P.A.</b> Models of quality analysis glass-charge on the basis of neural networks .....	79
<b>Koval' V.A., Torgashova O.Yu., Shvorneva O.E.</b> Control system for the process of the continous heating.....	83

**INFORMATION TECHNOLOGIES**

<b>Osiaev O.G., Neydorf R.A.</b> Model to analyze the technical condition of multilayer structure .....	86
<b>Bogdanov L.Y.</b> The evaluation of performance of binary classifiers based on logistic regression using roc analysis .....	93
<b>Daurov S.K., Novikov V.Y., Alexandrov N.O.</b> Computer processing image of the lumbar- sacral part for excretion of intervertebral disks .....	98
<b>Lyapina N.S., Suyatinov S.I.</b> Method of prediction of the human states development on the latent interrelations .....	101

<b>Suyatinov S.I., Torgashova O.Yu., Kirillov K.I., Peresun'kina A.V.</b> Model validation of the vascular wall dynamics .....	105
<b>Bolshakov A.A., Eliseev D.V., Musatov V.Yu., Sidorovich O.V., Elizarova S.Yu., Koroleva I.V., Drugin Yu.I., Skliarova E.Yu.</b> The combined method of automated diagnostics of urine remove system diseases on displazion of connecting fabrics background .....	108
<b>Mitrofanova T.A., Vuyko V.V., Zdragevskij R.A., Potahin S.N.</b> Hardware-software complex for the task of spatial position of tools at surgical operations .....	113
<b>Obolonsky M.O., Brovkova M.B.</b> Technique of definition of probability of elimination of threat of safety .....	116
<b>Bolshakov A.A., Buldakov N.S.</b> Cellular automatic machines for processing of images of minefields .....	120
<b>Dolinna O.N.</b> Classification of errors in knowledge bases of expert systems .....	125
<b>Dolinna O.N., Ermakov A.V.</b> Increasing of visual information processing efficiency by using of GRID computing .....	131
<b>Protalinsky O.M., Khanova A.A., Bondareva I.O.</b> Imitating model of technological processes of cargo port .....	134

#### CONTROL IN CLUSTER SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

<b>Gevlich I.K., Zaharov A.A., Tkachenko I.M.</b> Model of the control system of progress of general educational establishment .....	145
<b>Bolshakov A.A., Shatohin V.V.</b> Estimation of productivity of functioning of the automated training expert system .....	150
<b>Bolshakov A.A., Markelov A.Yu.</b> Control of knowledge in intellectual training system at the rate «reliability of systems of automation» .....	153
<b>Dolinina O.N., Pechenkin V.V., Tarasova V.V., Shatskih P.P.</b> Modified gravitational force-directed method of dynamic layout of educational organization social network .....	156
<b>Bolshakova M.A.</b> Creation of the automated learning system for learning of foreign language in not language high schools .....	161
<b>Popov P.S., Mirzayanova E.P., Angelyuk V.P.</b> The conceptual approach of sausage production at the present stage .....	164
<b>Tregubov V.N.</b> The synchronization concept for methodology of management of system of city public transport .....	168
<b>Tregubov V.N.</b> The synchronization concept as a basis of administration for self-organization logistical systems .....	176
<b>Kvyatkovskaya I.J., Shurshev V.F., Kvyatkovskiy K.I.</b> The integrated mechanisms of information support of decision-making of the large-scale territorially-distributed economic system .....	181
<b>Krasnova O.V.</b> Development of infrastructural projects taking into account relations of power structures and region business groups .....	190
<b>Polumordvinov O.A.</b> Organizational - the economic mechanism of management of investments into housing construction sphere.....	194
<b>Sedova Y.A., Kvyatkovskaya I.Y.</b> System analysis of the scientific documentation corpus.....	196
<b>Sytnik A.A.</b> Innovative infrastructure of modern economic systems.....	204
<b>Sytnik A.A.</b> The reasons and conditions of formation of national innovative system.....	209

# ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 51.001.57:681.518

**А.С. Моисеев, М.С. Светлов**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ТРАКТА ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DVB-T

*Рассматриваются способы исследования помехозащищенности и программные модели телевизионного тракта цифрового телевидения стандарта DVB-T. Приведены результаты исследований различных параметров передающего и приемного устройств на помехозащищенность тракта.*

Цифровое телевидение, кодирование, перемежение, передающее устройство, DVB-T, модуляция, сигнал, шум

**A.S. Moiseev, M.S. Svetlov**

## RESEARCH OF NOISE IMMUNITY TELEVISION TRACT DIGITAL TV DVB-T STANDARD

*The article describes how research noise immunity and software models of television canal digital broadcasting standard DVB-T. Conclusions about the impact of various parameters of the transmitting and receiving devices on the noise immunity tract.*

Digital television, coding, striping, transmitting devices, DVB-T, modulation, signal, noise

В процессе исследования телевизионного тракта цифрового телевидения наиболее важными объектами для изучения являются передающее и приемное устройства.

В реальной системе на помехозащищенность тракта существенное влияние оказывают множество факторов. Нами проведено исследование помехоустойчивости системы на базе математической модели. Математическая модель реализована с использованием специального программного продукта, учитывающего все методы обработки сигнала, заложенные в стандарте DVB-T и адекватно отображающего все происходящие процессы в телевизионном тракте.

Прохождение информации по телевизионному тракту цифрового телевидения стандарта DVB-T можно разделить на три основные части: преобразование информации в передающем устройстве, модуляция/демодуляция сигнала и обратное преобразование в приемном устройстве. Преобразование информации в передающем устройстве состоит из следующих этапов: скремблирование, внешнее кодирование, внешнее перемежение, внутреннее кодирование, внутреннее перемежение. Затем следует процесс передачи информации от передающего устройства к приемному и обратное преобразование в приемном устройстве: внут-

ренное деперемежение, внутреннее декодирование, внешнее деперемежение, внешнее декодирование и дескремблирование. Выбранная модель позволяет изменять следующие параметры: скорость сверточного кода в передающем устройстве, метод модуляции, уровень сигнал/шум в процессе модуляции и глубину проверки при внутреннем декодировании. Для исследования влияния перечисленных параметров на количество ошибок в приемном устройстве для всех интересующих нас значений каждого параметра были рассчитаны номинальные значения исходя из следующих принципов: значения должны быть приближены к реальным, они не должны перекрывать влияние изменяемых параметров, они должны вносить видимое влияние в моделируемые процессы. Номинальные значения исследуемых параметров представлены в табл. 1. Результаты моделирования представлены в табл. 2 - 6.

Таблица 1

Номинальные значения исследуемых параметров

Скорость кодирования	Метод модуляции	Уровень сигнал/шум	Глубина проверки
1/2 (2)	QAM-16	5	16

Таблица 2

Влияние скорости кодирования на помехозащищенность

Скорость кодирования	1/2 (1)	1/2 (2)	2/3	3/4	5/6	7/8
Исправлено во внешнем декодере	496	497	543	549	560	508
После внешнего декодирования	40	57	104	178	247	335
После внутреннего декодирования	588	604	697	806	875	920
После демодуляции	2103	1966	2439	2674	2863	2948
Принято байт - ошибок	40	57	104	355	422	335

Таблица 3

Влияние метода модуляции на помехозащищенность

Метод модуляции	QPSK	QAM-8	QAM-16	QAM-32	QAM-64	QAM-128
Исправлено во внешнем декодере	40	407	517	475	463	410
После внешнего декодирования	0	0	196	366	476	716
После внутреннего декодирования	44	439	775	920	1011	1191
После демодуляции	2568	2438	2487	1881	2346	2426
Принято байт - ошибок	0	0	196	366	476	1934

Таблица 4

Влияние уровня сигнал/шум на помехозащищенность

Сигнал/шум	1	2	3	4	5
Исправлено во внешнем декодере	0	0	0	180	538
После внешнего декодирования	8787	5241	2875	1271	90
После внутреннего декодирования	9537	5711	3122	1581	692
После демодуляции	20301	13812	8647	5018	2573
Принято байт - ошибок	10601	6981	3201	1271	90

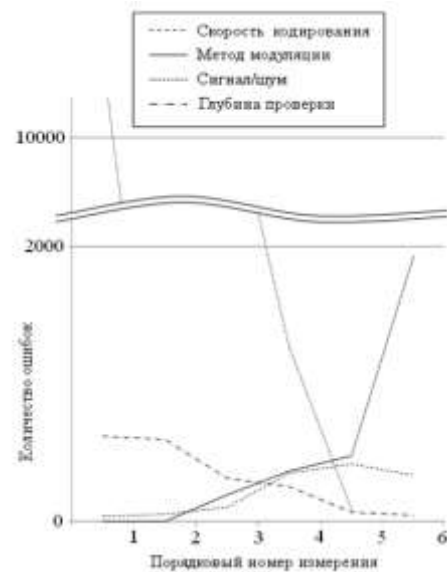


Таблица 5

## Влияние глубины проверки на помехозащищенность

Глубина проверки	2	4	8	16	32	64
Исправлено во внешнем декодере	454	441	537	440	516	460
После внешнего декодирования	465	423	135	77	67	49
После внутреннего декодирования	1000	938	733	563	643	550
После демодуляции	1918	2086	1978	1990	2051	2027
Принято байт - ошибок	623	599	312	255	67	49

Наиболее интересным и важным показателем является количество принятых байт – ошибок, так как ошибки, обнаруженные ранее, могут быть исправлены на последующих этапах обратного преобразования информации. Количество байт – ошибок определяется после завершения всех преобразований путем побайтного сравнения переданной и принятой информации. Анализ результатов исследований показывает, что наиболее чувствительными параметрами являются метод модуляции и уровень сигнал/шум, так как при изменении этих параметров крайние значения количества принятых байт – ошибок составляют наибольшее процентное соотношение. Также можно сделать вывод, что при различных комбинациях параметров можно обеспечить оптимальные режимы (с точки зрения минимума ошибок) и скомпенсировать влияние окружающей среды на реальный приемопередающий тракт.



Зависимость количества ошибок от значений изменяемых параметров

## ЛИТЕРАТУРА

1. Птачек М. Цифровое телевидение. Теория и техника / М. Птачек. М.: Радио и связь, 1990. 528 с.

**Моисеев Антон Сергеевич** –

студент первого курса магистратуры Саратовского государственного технического университета

**Светлов Михаил Семенович** –

доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 07.10.10*

УДК 001.57:681.518

**Р.В. Геранин, В.В. Киселёв, А.А. Львов, А.Е. Руденко, М.С. Светлов**

### **КЛАССИФИКАЦИЯ И ОЦЕНИВАНИЕ ПОМЕХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ QAM СИГНАЛОВ**

*В работе рассмотрены типичные варианты помех в каналах связи цифровых систем передачи информации с OFDM/QAM сигналами, дана классификация помех, определены виды искажений констелляционных диаграмм.*

Квадратурная модуляция, констелляционная диаграмма, помехи, мониторинг

**R.V. Geranin, V.V. Kiselev, A.A. Lvov, A.E. Rudenko, M.S. Svetlov**

### **INTERFERENCE CLASSIFICATION AND ESTIMATION IN QAM SIGNALS**

*In this work typical interferences in digital transfer systems' communication channels with OFDM/QAM signals are considered, interference classification is resulted, kinds of constellation diagram distortions are defined.*

Quadrature modulation, constellation diagram, interferences, monitoring

Возникла острая необходимость услуг передачи данных (Quality of Service, QoS) в цифровых сетях. В полной мере это относится и к сетям цифрового телерадиовещания. Для обеспечения надежной работы необходимы постоянный мониторинг сети и принятие своевременных корректирующих мер при обнаружении ошибок. Среди многих параметров и технических характеристик сети особое место занимает качество цифровой модуляции, существенным образом влияющее на принимаемый сигнал.

Рассматривается качество квадратурной амплитудной модуляции (Quadrature Amplitude Modulation, QAM). Такой тип модуляции широко применяется в телекоммуникационных и, в соответствии с международными стандартами, в цифровых телерадиовещательных системах. Современные методы мониторинга QoS в сетях с QAM основаны на оценке двух параметров: амплитуды вектора ошибок (Error Vector Magnitude, EVM) и частоты появления ошибочных битов (Bit Error Rate, BER).

Параметр EVM вычисляется как средняя амплитуда вектора разности векторов положения принятых символов на констелляционной диаграмме и их идеального положения. С помощью оценки EVM можно определить степень ухудшения качества модуляции, однако EVM не дает достаточной информации о возможных причинах снижения качества.

Частота BER характеризует долю принятых ошибочных битов и является мерой потери качества в сети. Для получения качественной оценки необходимо длительное время наблюдения. Кроме того, мониторинг, основанный на использовании BER, дает информацию об ухудшении качества уже после произошедшего в канале.

Мониторинг должен, во-первых, в режиме реального времени информировать о том, что происходит в линии связи; во-вторых, выдавать информацию о возможных причинах отклонений; в-третьих, предлагать действия по восстановлению функционирования до того,

как пользователь обнаружит сбой. Для этого необходим анализ неисправностей в канале и определение их влияния на передачу.

В отличие от известных методов, предлагается метод диагностики неисправностей в канале на базе рассмотрения квадратурных ошибок, что позволяет учесть разнообразные виды помех и получить их более точную оценку. По влиянию помех на вид констелляционной диаграммы с учетом статистики распределения принятых символов помехи можно разделить на три группы.

1. Помехи первого порядка: несогласованность амплитуд, сдвиг фазы и квадратурные ошибки. Эти помехи носят детерминированный характер и вызывают смещение принятых символов на постоянную величину. Несогласованность амплитуд возникает из-за различного усиления синфазных и квадратурных каналов в передатчике и приемнике, что вызывает симметрично расположенные сдвиги символов (рис. 1 а).

Сдвиг фазы является детерминированной ошибкой определения фазы несущей. Результатом воздействия такой помехи является поворот всей констелляционной диаграммы (рис. 1 б). Квадратурная ошибка возникает при ошибке в фазосдвигающем устройстве передатчика или приемника, которое должно сдвигать фазу на  $90^\circ$ . Результатом этой помехи является наклон всей диаграммы, так как ее компоненты теряют ортогональность (рис. 1 в).

2. Помехи второго порядка: дрожание фазы (джиттер) и помехи типа «белый шум». Эти помехи приводят к разбросу принятых символов вокруг соответствующих им позиций. Дрожание фазы возникает из-за беспорядочного разброса вычисленных значений фазы несущей частоты. Помеха проявляется в виде беспорядочного вращения диаграммы (рис. 1 г).

Помехи типа «белый шум» вызывают разброс точек диаграммы вокруг соответствующих им позиций (рис. 1 д).

3. Помехи третьего порядка отсутствуют ввиду симметричности распределения символов.

4. Помехи четвертого порядка: интерференция. Интерференция появляется при частичном совпадении ложного сигнала и сигнала в частотном диапазоне приемника. Интерференция проявляется в кольцевой форме точек диаграммы (рис. 1 е). Таким образом, распределение символов имеет компоненты выше второго порядка.

С учетом изложенного оценка влияния различных типов помех на вид констелляционной диаграммы предлагается проводить на основе анализа статистических моментов принятых символов. При этом оценка осуществляется на основе принципа максимального прав-

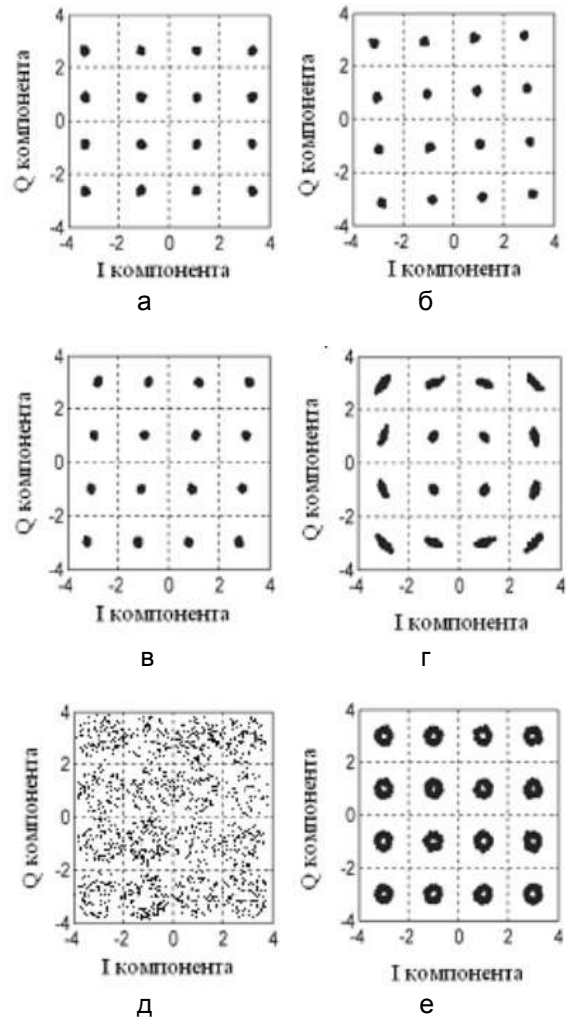


Рис. 1. Влияние помех на констелляционную диаграмму: а – несогласованность амплитуд; б – сдвиг фазы; в – квадратурная ошибка; г – дрожание фазы; д – «белый шум»; е – интерференция

доподобия. Граничные значения коэффициента правдоподобия вычисляются с использованием критерия минимума среднеквадратичной ошибки.



Рис. 2. Блок-схема метода

Принцип работы метода показан на рис. 2. Сначала символы распределяются по ячейкам. В соответствии с принципом максимального правдоподобия распределение символов по ячейкам проводится по критерию минимума расстояния: символ ассоциируется с той ячейкой, чей центр находится ближе к принимаемому символу. Этот критерий позволяет достаточно точно осуществить идентификацию принимаемых символов кодовых посылок с номерами ячеек конstellационной диаграмм. Некоторые ошибки могут возникать лишь в условиях крайне малых отношений сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) или при наличии помех очень большой интенсивности. Метод позволяет осуществить режим раннего обнаружения ошибок (неисправностей) в каналах с идентификацией их типов и, как результат, получить информацию о необходимых действиях по их парированию.

#### **Геранин Роман Валерьевич –**

студент Саратовского государственного технического университета

#### **Киселев Вадим Владимирович –**

аспирант, ассистент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

#### **Львов Алексей Арленович –**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

#### **Руденко Алексей Евгеньевич –**

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

#### **Светлов Михаил Семенович –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 07.10.10, принята к опубликованию 21.10.10*

УДК 51.001.57:681.518

В.В. Киселёв, А.А. Львов, А.Е. Руденко, М.С. Светлов, А.С. Мухамбетжанов

## МОНИТОРИНГ КАНАЛОВ В СИСТЕМАХ С OFDM/QAM СИГНАЛАМИ

*В работе рассмотрены математические модели каналов связи с помехами различного типа, их влияние на рабочие точки констелляционных диаграмм в системах с OFDM/QAM сигналами, даны рекомендации по мониторингу каналов.*

Мониторинг, качество канала связи, математические модели, помехи, констелляционная диаграмма

V.V. Kiselev, A.A. Lvov, A.E. Rudenko, M.S. Svetlov, A.S. Mukhambetzhano

## CHANNEL MONITORING IN SYSTEMS WITH OFDM/QAM SIGNALS

*In this work mathematical models of communication channels with various interferences, their influence on constellation diagrams' points in systems with OFDM/QAM signals are considered, recommendations about channel monitoring are made.*

Monitoring, communication channel quality, mathematic models, interferences, constellation diagram

В современных системах цифрового вещания в канале с аддитивными помехами, включая системы и сети цифрового телерадиовещания, широко используются OFDM/QAM сигналы. При этом качество систем во многом определяются возможностью применения методов мониторинга каналов. Целью такого мониторинга является выявление причин возникновения неисправностей в каналах и их последующее устранение.

Классический OFDM/QAM сигнал описывается уравнением

$$z(t) = \operatorname{Re} \left[ \exp(2\pi j f t) \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} (C_{r,s,h} \times \Psi_{r,s,h}(t)) \right], \quad (1)$$

$$\Psi_{r,s,h}(t) = \begin{cases} \exp(2\pi j h'(t - T_g - sT_s - NrT_s)/T_u) & \text{для } (s + Nr)T_s \leq t \leq (s + Nr + 1)T_s, \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (2)$$

$$h' = h - (H_{\max} + H_{\min})/2, \quad (3)$$

$$T_s = T_u + T_g, \quad (4)$$

где  $N$  – количество OFDM-символов в кадре передачи;  $h$  – номер поднесущей частоты;  $H_{\min}$  и  $H_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значения поднесущей частоты (нижняя и верхняя границы);  $s$  – номер OFDM-символа;  $r$  – номер кадра передачи;  $T_g$  – длительность защитного интервала;  $T_u$  – длительность полезной части OFDM-символа;  $T_s$  – длительность OFDM-символа;  $f$  – опорная частота передатчика;  $C_{r,s,h}$  – значение QAM-ячейки для поднесущей частоты  $h$  в символе  $s$  кадра  $r$ .

Рассмотрим процесс передачи одного кадра ( $t \in [0; NT_s]$ ):

$$z(t) = \operatorname{Re} \left[ \exp(2\pi j f t) \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} (C_{s,h} \times \Psi_{s,h}(t)) \right], \quad (5)$$

$$\Psi_{s,h}(t) = \begin{cases} \exp(2\pi j h'(t - T_g - sT_s)/T_u) & \text{для } sT_s \leq t \leq (s+1)T_s, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (6)$$

Сигнал  $z^*(t)$  на входе приёмного устройства имеет вид

$$z^*(t) = z(t) + n(t), \quad (7)$$

где  $n(t)$  – функция, описывающая сигнал помех и искажений в канале связи, накладывающийся на полезный сигнал  $z(t)$ .

Обратное преобразование даёт

$$C_{s,h}^* = \exp(-2\pi j f t) \sum_{\tau=sT_s}^{(s+1)T_s} (z^*(\tau) \times [\Psi_{s,h}(\tau)]^{-1}), \quad (8)$$

где  $C_{s,h}^*$  в общем виде можно представить соотношением

$$C_{s,h}^* = C_{s,h} + n_{s,h}, \quad (9)$$

где  $n_{s,h}$  – компонента  $n(t)$ , накладываемая на  $C_{s,h}$  в символе  $s$  частотной поднесущей  $h$  после преобразования (8).

Так как  $C_{s,h}^*$  является комплексным числом, его вещественную и мнимую части в (9) удобно представить в виде матрицы компонент канала:

$$\begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{C_{s,h}^*\} \\ \operatorname{Im}\{C_{s,h}^*\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{C_{s,h}\} \\ \operatorname{Im}\{C_{s,h}\} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{n_{s,h}\} \\ \operatorname{Im}\{n_{s,h}\} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Так как матрица линейного преобразования инвертируема, то ее геометрические искажения аналогичны последовательности отражений, вращений, расширений и сдвигов. В нашем случае отражения невозможны, т.к. помеха не способна вызвать такой трансформации. Остальные три трансформации соответствуют сдвигу фазы, несогласованности амплитуд и квадратурной ошибке. Также в типичном канале имеются межсимвольная интерференция, дрожание фазы (джиттер) и гауссов шум.

Рассмотрим каждую из трансформаций  $(\operatorname{Re}\{C_{s,h}\} \ \operatorname{Im}\{C_{s,h}\})^T \rightarrow (\operatorname{Re}\{C_{s,h}^*\} \ \operatorname{Im}\{C_{s,h}^*\})^T$  при отсутствии  $n_{s,h}$ . Фазовый сдвиг является детерминированной фазовой ошибкой, представляющей вращение констелляционной диаграммы вокруг оси на угол  $\theta_{\text{offset}}$ :

$$\begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{C_{s,h}^*\} \\ \operatorname{Im}\{C_{s,h}^*\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{\text{offset}} & -\sin \theta_{\text{offset}} \\ \sin \theta_{\text{offset}} & \cos \theta_{\text{offset}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{C_{s,h}\} \\ \operatorname{Im}\{C_{s,h}\} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Несогласованность амплитуд реализуется введением коэффициента усиления  $k_E$  для вещественного канала, отличного от соответствующего коэффициента усиления мнимого канала, т.е.

$$\begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{C_{s,h}^*\} \\ \operatorname{Im}\{C_{s,h}^*\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_E & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{C_{s,h}\} \\ \operatorname{Im}\{C_{s,h}\} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Квадратурная ошибка является результатом умножения на матрицу, вызывающую наклон констелляционной диаграммы

$$\begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{C_{s,h}^*\} \\ \operatorname{Im}\{C_{s,h}^*\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & k_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{C_{s,h}\} \\ \operatorname{Im}\{C_{s,h}\} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где  $k_s$  есть угол отклонения от ортогональности вещественной и мнимой компонент канала.

Разобьем компоненту  $n_{s,h}$  на две составляющие, одна из которых ( $n_s$ ) связана с межсимвольной интерференцией в символе  $s$ , а другая ( $n_h$ ) – аддитивный гауссов шум на частотной поднесущей  $h$ . Учитывая, что интерференция вызывается ложным сигналом, вызывающим сдвиг символов на констелляционной диаграмме, она моделируется вектором лож-

ного сигнала с амплитудой  $A$  и фазой  $\phi$ , зависящей от момента измерения и разности частот ложного и полезного сигналов.

Тогда матрица  $(\text{Re}\{n_{s,h}\} \quad \text{Im}\{n_{s,h}\})^T$  примет вид

$$\begin{pmatrix} \text{Re}\{n_{s,h}\} \\ \text{Im}\{n_{s,h}\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \cos \phi \\ A \sin \phi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{Re}\{n_h\} \\ \text{Im}\{n_h\} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Дрожание фазы в отличие от сдвига фазы, несогласованности амплитуд и квадратурной ошибки представляет случайную ошибку и вызывает поворот констелляционной диаграммы на угол  $\theta_i$ , являющийся случайной переменной с гауссовым распределением с нулевым средним значением и дисперсией  $\sigma_i^2$ , т.е.  $\theta_i \sim G(0, \sigma_i^2)$ . Тогда

$$\begin{pmatrix} \text{Re}\{C_{s,h}^*\} \\ \text{Im}\{C_{s,h}^*\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Re}\{C_{s,h}\} \\ \text{Im}\{C_{s,h}\} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Обобщая (10), с учётом (11) - (15) получим

$$\begin{pmatrix} \text{Re}\{C_{s,h}^*\} \\ \text{Im}\{C_{s,h}^*\} \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{\text{offset}} & -\sin \theta_{\text{offset}} \\ \sin \theta_{\text{offset}} & \cos \theta_{\text{offset}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_E & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & k_S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Re}\{C_{s,h}\} \\ \text{Im}\{C_{s,h}\} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A \cos \phi \\ A \sin \phi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{Re}\{n_h\} \\ \text{Im}\{n_h\} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Оценивание неизвестных параметров в (16) производится на основе анализа статистических моментов принятых символов  $C_{s,h}^*$ .

Аппроксимируя соотношение (16) на случай малых углов фазы, т.е. когда  $\sin \theta_{\text{offset}} \approx \theta_{\text{offset}}$  и  $\cos \theta_{\text{offset}} \approx \theta_{\text{offset}}$ , без учёта дрожания фазы и, рассматривая эффекты, вызванные различными видами помех как некоррелированные, получим следующие математические ожидания компонент  $C_{s,h}^*$

$$\begin{aligned} M[\text{Re}\{C_{s,h}^*\}] &= M[Kk_E \text{Re}\{C_{s,h}\} - K(k_E k_S - \theta_{\text{offset}}) \text{Im}\{C_{s,h}\}] \\ M[\text{Im}\{C_{s,h}^*\}] &= M[Kk_E \theta_{\text{offset}} \text{Re}\{C_{s,h}\} - K(k_E k_S - \theta_{\text{offset}} + 1) \text{Im}\{C_{s,h}\}]. \end{aligned} \quad (17)$$

На основе (17), анализируя множество принятых символов  $C_{s,h}^*$  за время передачи кадра ( $t \in [0; NT_s]$ ) можно оценить параметры  $K$ ,  $k_E$ ,  $k_S$  и  $\theta_{\text{offset}}$ .

Дрожание фазы определяется вычислением ковариации двух компонент принятого символа  $C_{s,h}^*$ :

$$\text{Cov}[\text{Re}\{C_{s,h}^*\}, \text{Im}\{C_{s,h}^*\}] = -K^2 k_E \sigma_i^2 (\text{Re}\{C_{s,h}\} \text{Im}\{C_{s,h}\} + [\text{Re}\{C_{s,h}\}]^2 k_S). \quad (18)$$

Из выражения (18) определяется дисперсия дрожания фазы  $\sigma_i^2$ .

Амплитуда  $A$  интерферирующего сигнала находится вычислением момента 4-го порядка  $m_4[\text{Re}\{C_{s,h}^*\}]$  от одной из компонент принятого символа  $C_{s,h}^*$  и дисперсии  $D[\text{Re}\{C_{s,h}^*\}]$ , возведённой в квадрат:

$$A = \left( 8D[\text{Re}\{C_{s,h}^*\}]^2 - \frac{8}{3}m_4[\text{Re}\{C_{s,h}^*\}] \right)^{1/4}. \quad (19)$$

Влияние гауссова шума можно оценить, вычислив дисперсию вещественной и мнимой частей  $C_{s,h}^*$ :

$$\begin{aligned} D[\text{Re}\{C_{s,h}^*\}] &= K^2 [\text{Im}\{C_{s,h}\}]^2 \sigma_i^2 + D[\text{Re}\{n_h\}] + \frac{1}{2}A, \\ D[\text{Im}\{C_{s,h}^*\}] &= K^2 ([\text{Re}\{C_{s,h}\}]^2 + k_S^2 [\text{Im}\{C_{s,h}\}]^2 + 2k_S \text{Re}\{C_{s,h}\} \text{Im}\{C_{s,h}\}) k_E^2 \sigma_i^2 + D[\text{Im}\{n_h\}] + \frac{1}{2}A. \end{aligned} \quad (20)$$

Таким образом, на основе отношений (16) - (20) модели (1) - (4) с помощью соответствующих анализаторов транспортного потока можно выявлять типичные искажения принимаемого сигнала, определять их влияние на передачу, в режиме реального времени информировать о том, что происходит в канале связи, определять возможные причины неисправ-

ностей и восстанавливать функционирование до того, как пользователь обнаружит сбой. Таким образом, возможен мониторинг канала с ранним обнаружением неисправностей.

Однако, если не требуется полная и точная информация о состоянии канала (например, в случае приёма сигнала конечным потребителем на соответствующее приёмное устройство), при этом необходимо идентифицировать искажения и принять меры по их нивелированию подстройкой под канал, т.е. отсутствует необходимость анализа всех  $C_{s,h}^*$ , то в этом случае с точки зрения расходования вычислительных ресурсов оптимальным является анализ принимаемых пилот-сигналов  $P_{s,p}^*$ , образующих подмножество множества всех  $C_{s,h}^*$  и равномерно распределённых в канале:

$$z(t) = \text{Re} \left[ \exp(2\pi j f t) \sum_{s=0}^{N-1} \left( \sum_{\substack{h=H_{\min} \\ h \in \mathbf{P}}}^{H_{\max}} (C_{s,h} \times \Psi_{s,h}(t)) + \sum_{p \in \mathbf{P}} (P_{s,p} \times \Psi_{s,p}(t)) \right) \right], \quad (21)$$

где  $p$  – номер пилотной поднесущей частоты,  $p \in [H_{\min}; H_{\max}]$ ; совокупность  $p$  образует множество  $\mathbf{P}$  пилот-поднесущих частот.

Тогда соотношения (16)-(20) примут вид

$$\begin{pmatrix} \text{Re}\{P_{s,p}^*\} \\ \text{Im}\{P_{s,p}^*\} \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{\text{offset}} & -\sin \theta_{\text{offset}} \\ \sin \theta_{\text{offset}} & \cos \theta_{\text{offset}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_E & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & k_S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Re}\{P_{s,p}\} \\ \text{Im}\{P_{s,p}\} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A \cos \phi \\ A \sin \phi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{Re}\{n_p\} \\ \text{Im}\{n_p\} \end{pmatrix}, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} M[\text{Re}\{P_{s,p}^*\}] &= M[K k_E \text{Re}\{P_{s,p}\} - K(k_E k_S - \theta_{\text{offset}}) \text{Im}\{P_{s,p}\}] \\ M[\text{Im}\{P_{s,p}^*\}] &= M[K k_E \theta_{\text{offset}} \text{Re}\{P_{s,p}\} - K(k_E k_S - \theta_{\text{offset}} + 1) \text{Im}\{P_{s,p}\}], \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{Cov}[\text{Re}\{P_{s,p}^*\}, \text{Im}\{P_{s,p}^*\}] = -K^2 k_E \sigma_i^2 (\text{Re}\{P_{s,p}\} \text{Im}\{P_{s,p}\} + [\text{Re}\{P_{s,p}\}]^2 k_S), \quad (24)$$

$$A = \left( 8D[\text{Re}\{P_{s,p}^*\}]^2 - \frac{8}{3} m_4 [\text{Re}\{P_{s,p}^*\}] \right)^{1/4}, \quad (25)$$

$$D[\text{Re}\{P_{s,p}^*\}] = K^2 [\text{Im}\{P_{s,p}\}]^2 \sigma_i^2 + D[\text{Re}\{n_p\}] + \frac{1}{2} A, \quad (26)$$

$$D[\text{Im}\{P_{s,p}^*\}] = K^2 ([\text{Re}\{P_{s,p}\}]^2 + k_S^2 [\text{Im}\{P_{s,p}\}]^2 + 2k_S \text{Re}\{P_{s,p}\} \text{Im}\{P_{s,p}\}) k_E^2 \sigma_i^2 + D[\text{Im}\{n_p\}] + \frac{1}{2} A.$$

Следовательно, в зависимости от требований к мониторингу состояния канала можно рекомендовать использование соотношений (16) - (20) – в интересах вещателя, когда необходима полная информация, или соотношений (22) - (26) – потребителя, когда необходимо подстроиться под канал. Алгоритмы, реализующие модели (16) - (20) или (22) - (26), ориентированы на внедрение их в системах цифровой передачи информации с OFDM/QAM-сигналами, относительно легко реализуемы в аппаратуре на базе СБИС или ПЛИС и, как следствие, могут быть встроены в любой приёмник или анализатор транспортного потока с ранним обнаружением неисправностей канала связи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Киселёв В.В. Разработка модели и исследование помехоустойчивости цифровых систем телерадиовещания / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб. тр. МНК ММТТ-21. Саратов: СГТУ, 2008.
2. Киселёв В.В. Проблемы электромагнитной совместимости в цифровом телерадиовещании / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб. тр. МНК ММТТ-22. Псков: ППИ, 2009.
3. Киселёв В.В. Одночастотная сеть эфирного цифрового вещания с учётом модели местности / В.В. Киселёв, М.С. Светлов // Сб. тр. МНК ММТТ-23. Саратов: СГТУ, 2010.

**Киселев Вадим Владимирович** –

аспирант, ассистент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета



**Львов Алексей Арленович** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Руденко Алексей Евгеньевич** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Светлов Михаил Семенович** –

доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Мухамбетжанов Арман Сулейманович** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 06.10.10, принята к опубликованию 20.10.10*

УДК 621.317.7

**А.А. Шевченко, А.А. Львов, В.В. Гуреев, В.А. Пыльский**

## **ПРИМЕНЕНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЯ СИГНАЛА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ «ТОКОВАЯ ПЕТЛЯ» ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ**

*Описан метод измерения температуры с помощью резистивных датчиков, свободный от ошибок измерений, связанных с влиянием факторов окружающей среды, механических воздействий и естественного «старения» компонентов измерителя.*

Токовая петля, датчик, аналого-цифровой преобразователь, мультиплексор

**A.A. Shevchenko, A.A. Lvov, V.V. Gureev, V.A. Pylskiy**

## **APPLICATION OF THE SIGNAL CONDITIONER "CURRENT LOOP" FOR TEMPERATURE MEASUREMENTS**

*The temperature measurement method free of uncertainties caused by the environment influence, mechanical effects as well as natural deterioration of components is described.*

Current loop, transducer, analog-to-digital converter, multiplexer

Топология линейной петлевой схемы обработки сигналов с параметрических датчиков описана в [1]. Целью этой схемы является устранение измерительных ошибок, возникающих из-за влияния длинных проводников, связывающих датчики с измерительным оборудованием [1]. Во многих приложениях токовая петля значительно превосходит классические схемные решения в виде моста Уитстона и цепи Кельвина. С развитием цифровых технологий и полупроводниковой техники в целом токовая петля стала доминирующим техническим решением для обеспечения высокоточных измерений сопротивления датчиков измерительных систем.

Входные дифференциальные каскады, которые используются в формирователе сигнала параметрических датчиков «токовая петля» (ТП), реализуются на базе измерительных усилителей (ИУ). Благодаря их применению обеспечиваются такие фундаментальные свойства формирователя сигнала ТП, как высокое входное сопротивление и большой коэффициент подавления синфазных сигналов. Буферизованные ими отклики датчика и опорного элемента оцифровываются двумя АЦП (или одним мультиплексированным АЦП) и вводятся для дальнейшей обработки в цифровое вычислительное устройство. Применение в качестве последнего персональной ЭВМ не всегда является оптимальным решением, так как ЭВМ обладает значительными габаритами и энергопотреблением.

Более рациональным вариантом при создании автоматических измерительных и управляющих систем является применение современного микроконтроллера со встроенным или внешним двухканальным или мультиплексированным АЦП.

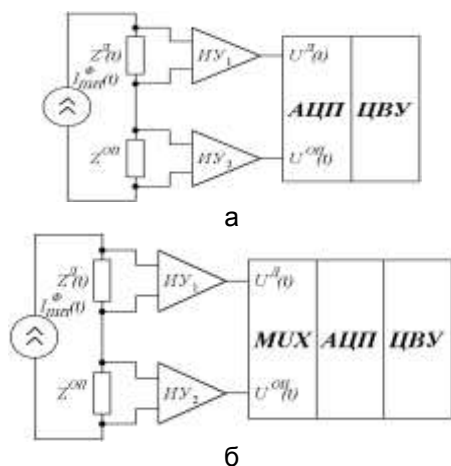


Рис. 1. Функциональная схема формирователя «токовая петля» с цифровым УСДН:  
 а – с двухканальным АЦП;  
 б – с мультиплексированным АЦП, MUX – мультиплексор

Микропроцессорная обработка измерительной информации позволяет использовать большее число измерений, а результат получать с помощью оптимальных статистических методов оценивания неизвестных параметров сигнала. Увеличение числа измерений в одной выборке обеспечивает более точные измерения. Однако это требует большей тактовой частоты аналого-цифрового преобразователя (АЦП), большего объема памяти и повышает аппаратные затраты. Поэтому, кроме увеличения количества измерений, необходимо повышать точность оцениваемых параметров исследуемых выходных сигналов формирователя ТП на основе оптимального выбора состава измерений, базирующегося на применении теории планирования эксперимента [2].

Однако на практике часто возникает необходимость в масштабировании входных сигналов перед тем, как обрабатывать их с помощью АЦП. Масшта-

бирование осуществляется с помощью усилительных каскадов, подключаемых между каналами АЦП и токовой петлей. Предположим, что усилительные каскады имеют разные коэффициенты усиления по напряжению, а коды АЦП линейно зависят от измеряемых напряжений

$$N_m = aV_m, \quad N_{ref} = bV_{ref},$$

где  $N_m$  – код АЦП, соответствующий напряжению  $V_m$ ;  $N_{ref}$  – код АЦП, соответствующий напряжению  $V_{ref}$ . В этом случае сопротивление датчика будет вычисляться по формуле

$$R = R_{ref} N_m / N_{ref} = R_{ref} a V_m / (b V_{ref}).$$

Использование усилительных каскадов для измерения напряжений на эталонном резисторе и на датчике приводит к зависимости результата измерений от отношения коэффициентов усиления данных каскадов. Коэффициенты усиления каскадов могут изменяться из-за зависимости параметров электронных приборов от температуры, влажности, механических воздействий. Режим работы электронного прибора при изменяющихся внешних условиях относят к динамическим режимам. Изменения коэффициентов усиления могут быть вызваны также естественными необратимыми процессами в электронных приборах (старением). Для того, чтобы исключить влияние коэффициентов усиления промежуточных каскадов преобразования входных сигналов, необходимо использовать только один промежуточный каскад с заданным коэффициентом усиления, а процесс масштабирования сигналов разделить во времени переключения входных каналов (рис. 2).

Конфигурация токовой петли, представленная на рис. 2, полностью исключает влияние изменения коэффициента усиления промежуточного каскада на результат измерений только в том случае, если за время коммутации входных сигналов данный коэффициент остается постоянным. Во многих прецизионных приложениях после коммутации входных сигналов несколько отсчетов АЦП отбрасываются перед тем как получить отсчет, используемый для вычисления сопротивления датчика. Эта мера необходима из-за возникновения нежелательных переходных процессов после коммутации сигналов. В связи с этим время между коммутацией сигналов возрастает, а, следовательно, вероятность того, что коэффициент усиления за это время изменится на величину, приводящую к появлению существенной ошибки измерения.

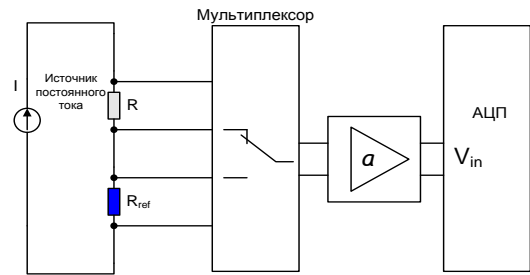


Рис. 2. Конфигурация токовой петли с использованием одноканального АЦП и мультиплексора

Рассмотрим наиболее распространенный случай прецизионных измерений сопротивления с помощью токовой петли – измерение сопротивления эталонного термометра сопротивления. Конфигурация токовой петли измерительного прибора аналогична рис. 1. Предположим, что один отсчет АЦП можно представить как

$$N_i = \tilde{N}(t_i) + \xi_i, \quad i=0..m, \quad (1)$$

где  $\xi_i$  – аддитивный гауссовский шум;  $t_i$  – момент времени, в который происходит выборка. Для уменьшения влияния случайного воздействия  $\xi_i$  на результат измерений после каждой коммутации сигналов считывается несколько значений  $N_i$  для последующего сглаживания. В случае одного термометра и одного эталонного резистора получается два набора отсчетов:

$$(N_{ref})_i = N_i, \quad i=0..k, \quad (N_m)_i = N_i, \quad i=l..l+k. \quad (2)$$

Период одного измерения составляет  $t_{l+k}$ , а между моментами времени  $t_k$  и  $t_l$  ( $t_k < t_l$ ) происходит коммутация входных сигналов и предварительная подготовка АЦП. Традиционный метод вычисления сопротивления  $R_m$  состоит в нахождении отношения:

$$R = R_{ref} \bar{N}_m / \bar{N}_{ref}, \quad (3)$$

где  $N_m = 1/(k+1) \sum_{i=0}^k (N_m)_i$ ,  $N_{ref} = 1/(k+1) \sum_{i=0}^k (N_{ref})_i$ . Вычисление сопротивления термометра по формуле (3) возможно корректно только в том случае, если  $\tilde{N}(t_i) = const$  во время одного измерения.

Предположим, что вследствие дрейфа параметров усилительного каскада  $\tilde{N}(t_i)$  медленно изменяется с течением времени так, что отсчеты АЦП при измерениях напряжений на эталонном резисторе и термометре можно представить в виде полиномов степени  $M$ :

$$\tilde{N}_{ref}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{i=M} a_i (t - t_0)^i, \quad t_0 \leq t \leq t_k; \quad (4)$$

$$\tilde{N}_m(t) = b_0 + \sum_{i=1}^{i=M} b_i (t - t_l)^i, \quad t_l \leq t \leq t_{l+k}. \quad (5)$$

Тогда сопротивление термометра на момент времени  $t_{l+k}$  должно вычисляться по формуле

$$R = R_{ref} \tilde{N}_m(t_{l+k}) / \tilde{N}_{ref}(t_{l+k}), \quad (6)$$

то есть значение  $\tilde{N}_{ref}$  экстраполируется на момент времени  $t_{l+k}$ . Коэффициенты  $a_i$  полинома (4) оцениваются с помощью метода наименьших квадратов по набору данных  $N_{ref}(t_i)$  при  $i=0..k$ , коэффициенты  $b_i$  полинома (5) – по набору данных  $N_m(t_i)$  при  $i=l..l+k$ .

Эффективность предложенного метода проверялась на сравнении двух схемных решений (блок-схема измерительной части приборов показана на рис. 1, 2) на экспериментальных макетах электронных приборов.

Электронные приборы испытывались в двух режимах: измерение постоянного сопротивления датчика в условиях постоянно изменяющейся температуры среды. В режиме с изменяющейся температурой среды прибор сначала нагревался до температуры +50°C, а затем естественной конвекцией охлаждался до комнатной температуры +20°C. Для аппроксимирующих полиномов (4), (5) выбиралась вторая степень.

Результаты экспериментов следующие: приборы при постоянной температуре среды +20°C показали почти одинаковые значения, а вот когда температура изменялась от +50°C до +20°C, прибор, разработанный на основе блок-схемы, представленной на рис. 2, позволил уменьшить динамическую ошибку измерения сопротивления датчика температуры в 6 раз.

Из эксперимента можно сделать вывод, что использование мультиплексора при обработке входных сигналов с использованием формирователя сигнала параметрических датчиков, включенных в токовую петлю, позволяет получить более точные результаты измерений, при этом избавиться от ошибок измерений, которые возникают из-за зависимости параметров электронных приборов от температуры, влажности, механических воздействий и естественного «старения» прибора в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Львов А.А. Линейная петлевая схема обработки сигналов с датчиков / А.А. Львов, В.А. Пыльский // Вестник СГТУ. 2004. № 2(3). С.102-112.

2. Gureev V.V. Improvement of the Current Loop Circuit for AC and DC Applications Based on Digital Signal Processing / V.V. Gureev, A.A. L'vov, V.A. Pylskiy // Instrumentation and Measurement Technology Conference: Proceedings of the 23rd IEEE IMTC / IEEE, Italy, Sorrento, 2006. P. 1257-1261.

#### **Шевченко Андрей Алексеевич –**

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

#### **Львов Алексей Арленович –**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

#### **Гуреев Владимир Валерьевич –**

доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

#### **Пыльский Виктор Александрович –**

доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 11.10.10, принята к опубликованию 25.10.10*

УДК 001.57.861.518

**М.С. Светлов, М.А. Попов**

### **ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ОДНОЧАСТОТНОЙ СЕТИ**

*Проводится оценка скоростных характеристик канала передачи для одночастотной сети цифрового вещания формата DVB.*

Цифровое телевидение, DVB-H, одночастотные сети

M.S. Svetlov, M.A. Popov

## ESTIMATION OF DESCRIPTIONS OF CHANNEL OF TRANSMISSION FOR SINGLE FREQUENCY NETWORK

*In the article the estimation of speed descriptions of channel of transmission is conducted for the one frequency network of the digital broadcasting of format of DVB.*

Digital TV, DVB-H, single frequency networks

Одним из достоинств цифрового телерадиовещания является существенная экономия частотного ресурса. В частности, это достигается построением так называемых одночастотных сетей. Рассмотрим некоторые особенности таких сетей.

Для нормального функционирования приемопередающего тракта сети излучение символа рабочего сигнала в пределах каждой выделенной частотной зоны должно происходить одновременно. Это требует однозначной и синхронной (тождественной) модуляции несущей частоты всех передающих устройств в зоне выделения. При этом должна быть обеспечена соответствующая требованиям стандартов точность поддержания значений несущих частот, что особенно важно для соседних частотных зон. В свою очередь, это определяется допустимыми значениями частотного разноса (интервала частот)  $\Delta f$  между соседними несущими частотами [1]. Если  $f_k$  – идеальное значение поднесущей частоты на позиции  $k$ ; несущей частоты в ее высокочастотном спектре, то каждый из передатчиков должен излучать эту  $k$ ; поднесущую частоту с допуском  $\delta f$ :

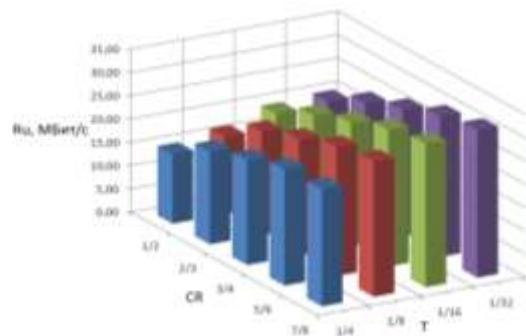
$$\delta f = f_k \pm \Delta f / 1000. \quad (1)$$

Такая стабильность может быть обеспечена применением гетеродинов с внешним генератором опорного сигнала. В качестве источника синхронизирующих импульсов используются сигналы с GPS (Global Positioning System – глобальная система позиционирования). Такая временная синхронизация системы предусматривает возможность пересечения зон покрытия от разных передатчиков без появления существенных помех, т.е. синхронизация передатчиков в зонах одночастотной сети должна исключить зависимость работы приемопередающего тракта от временных задержек, вносимых транспортной сетью.

Для сети DVB-H (формат цифрового телевидения для мобильных устройств) обеспечение синхронных режимов работы передатчиков особенно важно. Как показывает анализ различных режимов работы одночастотных сетей для мобильного телерадиовещания, точность временной синхронизации с разбросом в пределах  $\pm 1$  мкс является вполне достаточной. Полезная скорость  $R_u$  передачи данных в сети зависит от относительной скорости свёрточного кодирования, метода модуляции несущей частоты и длительности защитных интервалов

$$R_u = R_s \cdot b \cdot CR \cdot CRrs (T_u / T_s), \quad (2)$$

где  $R_s$  – символьная скорость (6,75 Мсимв/с);  $b$  – число битов в модулированной несущей частоте;  $CR$  – относительная скорость свёрточного кодирования;  $CRrs$  – скорость кодирования кодом Рида-Соломона;  $T_u/T_s$  – отношение длительности полезного интервала к полной длительности символа.



Зависимость скорости передачи от скорости свёрточного кодирования и длительности защитного интервала при модуляции QAM64

Как показывают расчеты, максимально возможная скорость передачи данных для реальных систем, строящихся в основном с использованием имеющихся антенно-мачтовых сооружений, максимальное расстояние между соседними передатчиками не может превышать расстояний примерно в 50 - 60 км [2].

Длительность защитного интервала при этом находится в диапазоне 200 – 240 мкс, что соответствует стандартному значению защитного интервала в формате DVB 224 мкс (четверти периода следования битовых разрядов кодовых посылок). Максимальное число разрядных битов равно 6 (для модуляции QAM64). Максимальная скорость свёрточного кодирования равна  $7/8$ , а скорость кодирования кодом Рида-Соломона равна  $188/204 = 0,92$ . При таких параметрах полезная скорость передачи данных в канале связи равна величине 25,13 Мбит/с. На рисунке представлена диаграмма, иллюстрирующая зависимость скорости передачи от характеристик канала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ETSI EN 302 304 V1.1.1 (2004-06). Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H).
2. Светлов М.С. Об одном из способов защиты от ошибок в системах цифрового телевидения / М.С. Светлов, М.А. Попов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22: сб. науч. тр. Саратов, 2009. Т.8.

**Попов Максим Андреевич** –

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

**Светлов Михаил Семенович** –

доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 05.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

---

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

---

УДК 66.011.001.57

**А.В. Майстренко, Н.В. Майстренко**

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ГИБКИХ ХТС В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

*Рассматривается работа информационной системы моделирования и проектирования химико-технологических процессов для автоматизированного проектирования принципиальных технологических схем в условиях неопределенности входных данных. Приведен алгоритм решения двухэтапной задачи с вероятностными ограничениями.*

Неопределенность, гибкие ХТС, технологическая схема, задача оптимизации

**A.V. Maystrenko, N.V. Maystrenko**

## **AIDED DESIGN OF BASIC TECHNOLOGICAL SCHEME FLEXIBLE CTD UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY**

*The work of information system modeling and design of chemical processes for computer-aided design principle of technological schemes in the face of uncertainty of input data. The algorithm for solving two-stage problem with probabilistic constraints.*

Uncertainty, flexible CTD, flowsheet, optimization problem

Анализ и синтез современных химико-технологических схем, имеющих, как правило, рециклы и замкнутую структуру, повышение качества и сокращение сроков их проектирования невозможно выполнить без применения современных средств компьютерного моделирования и интерактивных программных систем.

При моделировании и проектировании технических объектов необходимо учитывать неполноту (неопределенность) информации о ХТС. Кроме того, на этом этапе приобретают решающее значение задачи автоматизации процесса подготовки, сбора и обработки больших объемов информации, в том числе графической, и максимального использования накопленных инженерных знаний при оптимизации и проектировании ХТС в условиях неопределенности. Решение этих задач требует создания компьютерной среды для формализации профессиональных знаний и инструментальных средств, облегчающих и ускоряющих исследователям и проектировщикам процессы подготовки, сбора и анализа исходных данных, а также интерактивного моделирования, оптимизации и проектирования ХТС. В традиционной схеме компьютерного моделирования компьютерная поддержка осуществляется только на стадии проведения вычислительного эксперимента, не учитывая такие стадии как построение математической

модели функционирования ХТС, выбор экономического алгоритма и составление программы, формализация и решение задач оптимизации, анализ и обработка результатов компьютерного моделирования и оптимизации ХТС, синтез технологических схем.

Традиционно при проектировании решается следующая задача оптимизации

$$\min_{d,z} I(d, x, z, \xi^N) \quad (1)$$

при связях и ограничениях

$$\begin{aligned} h(d, x, z, \xi^N) &= 0, \\ \bar{g}_j(d, x, z, \xi^N) &\leq 0, \quad j \in J, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $J$  – множество индексов ограничений работоспособности,  $z$  обозначает управляющие переменные,  $x$  соответствует переменным состояния производства, а  $\xi$  задает неопределенные параметры,  $\Xi = \{\xi \mid \xi^L \leq \xi \leq \xi^H\}$ . Это могут быть ограничения по качеству, производительности аппаратов, безопасности производства, экологической безопасности и др.

Если вектор переменных состояния  $x$  выразить (может быть, неявно) как функцию  $d, z, \xi^N$  из уравнений материального и теплового баланса  $h(d, x, z, \xi^N) = 0$  и подставить в зависимости  $I(d, x, z, \xi^N)$  и  $\bar{g}_j(d, x, z, \xi^N)$ , то получим известную «приведенную» постановку задачи оптимизации:

$$\min_{d,z} I(d, z, \xi^N) \quad (3)$$

при ограничениях

$$\bar{g}_j(d, z, \xi^N) \leq 0, \quad j \in J. \quad (4)$$

Учет неопределенности вектора  $\xi$  при традиционном проектировании осуществляется введением эмпирического коэффициента запаса  $\gamma_{\text{зап}}$  (обычно  $\gamma_{\text{зап}} = 1,25$ ) к размерам оборудования, полученным в результате решения традиционной задачи оптимизации. Традиционная процедура не имеет рациональной основы для выбора коэффициента запаса  $\gamma_{\text{зап}}$ , что часто приводит к неработоспособности спроектированного химического производства и необходимости его перепроектирования.

Поэтому одним из важнейших моментов, на который следует обязательно обращать внимание при проектировании химического производства, является обеспечение работоспособности проектируемого производства, выражающееся в обеспечении гибкости проектируемого производства, то есть способности производства иметь допустимую рабочую точку (режим) функционирования для всего диапазона  $\Xi$  неопределенных условий, которые могут возникать в процессе эксплуатации этого производства.

Математическая постановка задачи анализа гибкости проектируемого производства при заданных вариантах структуры производства  $\mu_\Omega$ , ассортименте  $\Omega$  выпускаемых продуктов, типов аппаратного оформления ХТП может быть сформулирована следующим образом: для фиксированного значения  $d^* \in D$  требуется подобрать вектор управляющих переменных  $z$  в статике, при которых выполняется условие гибкости [1]:

$$\forall \omega_i \in \Omega \quad F(d^*) = \text{Bep}_\xi \left\{ \min_z \max_{j \in J} g_j(d, z, \xi) \leq 0 \right\}, \quad (5)$$

где  $F(d^*)$  – соответствует функции гибкости проекта производства с вектором  $d^*$ .

При  $F(d^*) \geq \rho_{\text{зад}}$  получаем работоспособный проект производства для заданного ассортимента выпускаемой продукции и всей области  $\Xi$  возможных изменений вектора неопределенных параметров  $\xi$ . При  $F(d^*) < \rho_{\text{зад}}$  проект неработоспособен для некоторой области  $\Xi$  и при выпуске определенных продуктов  $\omega_i$  из заданного ассортимента  $\Omega$ .

С учетом введенного понятия гибкости задача оптимального проектирования может быть сформулирована следующим образом. Требуется определить вектор конструктивных параметров  $d^* \in D$ , такой чтобы достигался минимум некоторой целевой функции:



$$I^* = \min_d M_\xi \left\{ \min_z I(d, z, \xi) \mid g_j(d, z, \xi) \leq 0, j \in J \right\} \quad (6)$$

при ограничениях  $F(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(d, z, \xi) \leq 0$ .

Для формулировки задачи синтеза работоспособных (гибких) ХТП и систем необходимо задать форму целевой функции и определить ограничения. В основе этого определения лежит концепция двух этапов ХТП: этапа проектирования (на этом этапе неопределенность присутствует практически всегда) и этапа эксплуатации. На втором этапе возможны различные случаи, в том числе следующий.

На этапе эксплуатации неопределенные параметры  $\xi$  могут быть определены в каждый момент времени и управляющие переменные  $z$  могут быть использованы для обеспечения выполнения ограничений. Условие гибкости ХТП в этом случае запишется так

$$\forall \xi \in \Xi, \exists z, \forall j \in J: g_j(d, z, \xi) \leq 0 \text{ или } F_2(d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(d, z, \xi) \leq 0,$$

а задача стохастической оптимизации с жесткими ограничениями имеет вид:

$$I_2^* = \min_d M_\xi \left\{ \min_z I(d, z, \xi) \mid g_j(d, z, \xi) \leq 0, j \in J \right\} = \min_d I^\oplus(d, \xi), \quad (7)$$

где  $I^\oplus = I^\oplus(d, \xi) = \int_{\Xi} (\min_z I(d, z, \xi) \mid g_j(d, z, \xi) \leq 0, j \in J) P(\xi) d\xi$ .

Это так называемая двухэтапная задача стохастической оптимизации с жесткими ограничениями.

В случае использования мягких (вероятностных) ограничений условие гибкости запишется как  $\rho_{\text{зад}} - \text{Вер}\{\xi \in \Xi^\otimes\} \leq 0$  где  $\Xi^\otimes(d) = \{\xi: \min_z \max_{j \in J} g_j(d, z, \xi) \leq 0, \xi \in \Xi\}$ , а значение целевой функции  $I^\oplus(d, \xi)$  может быть найдено из решения задачи:

$$I^\oplus(d, \xi) = \begin{cases} \int_{\Xi^\otimes} (\min_z I(d, z, \xi) \mid g_j(d, z, \xi) \leq 0, j \in J) P(\xi) d\xi, & \text{если } \xi \in \Xi^\otimes; \\ \int_{\Xi \setminus \Xi^\otimes} (\min_z [I(d, z, \xi) + A \cdot \max_{j \in J^\otimes} g_j(d, z, \xi), 0]) P(\xi) d\xi, & \text{если } \xi \notin \Xi^\otimes, \end{cases} \quad (8)$$

где  $A$  – штрафной коэффициент;  $J^\otimes$  – множество индексов ограничений, за нарушение которых берется штраф.

Отметим, что если существует такое  $d$ , что  $F_2(d) \leq 0$ , то при  $\rho_{\text{зад}} = 1$  задача оптимизации с мягкими ограничениями переходит в задачу с жесткими ограничениями.

Таким образом, оптимизационная задача при проектировании ХТП может быть сформулирована с учетом различных уровней информации о ХТП, доступной на этапе его эксплуатации. Каждое решение дает оптимальный вариант ХТП для заданного уровня информации. Разработка более точных моделей, установка новых измерительных приборов и систем автоматического управления для стабилизации неопределенных параметров повышают уровень доступной информации о ХТП, но требуют дополнительных затрат. При этом возникает важная проблема выбора оптимального (или разумного) уровня экспериментальной информации в качестве исходных данных для проектирования ХТП.

В терминах теории  $A$ -задач оптимизации двухэтапную задачу с вероятностными ограничениями можно переформулировать следующим образом: требуется найти  $m$ -мерный вектор постоянных величин  $\alpha^* = (\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_m^*)$  и вектор конструктивных  $d_{\alpha^*}$  переменных таких, что

$$I(d_{\alpha^*}) = \min_{\alpha \in A} \left\{ \min_d \sum_{k \in K} \gamma_k \cdot (\min_z I(d, z, \xi^k) \mid g_j(d, z, \xi^k) \leq \alpha_j, j \in J) \right\}, \quad (9)$$

где  $A = \left\{ \alpha \mid \forall j \text{ Вер}_\xi \left[ \min_z \max_{j \in J} g_j(d_\alpha, z_\alpha, \xi) \leq 0 \right] \geq \rho_{\text{зад}} \right\}$ ,  $\gamma_k$  – весовые коэффициенты, которые присвоены каждой точке  $\xi^k$ ,  $\sum_{k=1}^K \gamma_k = 1$ .

Алгоритм решения двухэтапной задачи стохастической оптимизации включает выполнение следующих шагов:

Шаг 1. Положить  $\nu = 0$ , выбрать начальное приближение вектора  $\alpha^\nu = (\alpha_1^\nu, \alpha_2^\nu, \dots, \alpha_m^\nu)$ , совокупность аппроксимационных точек  $K$  и начальное множество критических точек  $S_i^{(\nu)}$ .

Шаг 2. Методом последовательного квадратичного программирования решить задачу нелинейного программирования

$$I^{(\nu)} = \min_{d, z^{(r)}, \xi^{(r)}} \sum_{r \in R} \gamma_r I(d, z, \xi^{(r)}) \quad (10)$$

при ограничениях  $g_j(d, z^{(r)}, \xi^{(r)}) \leq \alpha^\nu, r \in R$ ;  $g_j(d, z^{(i)}, \xi^{(i)}) \leq \alpha^\nu, i \in S_i^{(\nu)}, j \in J$ .

Пусть  $z^{k,(\nu)}, z^{i,(\nu)}, d_{\alpha^\nu}$  – решение этой задачи.

Шаг 3. В точке  $d_{\alpha^\nu}, z_{\alpha^\nu}$  вычисляются вероятности выполнения ограничений с использованием имитационной модели ХТП и проверяется выполнение условий:

$$\text{Вер}_\xi \{ \min_z \max_{j \in J} g_j(d_{\alpha^\nu}, z_{\alpha^\nu}, \xi) \leq 0 \} \geq \rho_{\text{зад}}, j \in J. \quad (11)$$

Шаг 4. Если вероятностные ограничения не выполняются для каких-то номеров  $j \in J$ , т.е.  $\alpha^\nu \notin A$ , то включается алгоритм входа в допустимую область  $A$ , образуется новое множество критических точек  $S_i^{(\nu+1)} = S_i^{(\nu)} \cup \{ \xi^{(\nu)*} \}$ , принимается  $\nu = \nu + 1$  и осуществляется переход к шагу 2, в противном случае – переход к следующему шагу 5.

Шаг 5. Определить вектор  $\alpha^*$  из решения внешней  $A$ -задачи оптимизации

$$I(d_{\alpha^*}, z_{\alpha^*}) = \min_{\alpha \in A} I(d_\alpha, z_\alpha). \quad (12)$$

Рассмотренная постановка задачи, алгоритм ее решения реализованы в информационной системе моделирования и проектирования химико-технологических процессов и проверялись нами на примере как проектирования отдельных реакторных систем типа «царга-тарелка» для двух наиболее типичных процессов тонкого органического синтеза – процессов diazotирования и азосочетания производства азоксигментов [2], так и разработки принципиальных технологических схем гибкого производства азоксигментов в целом.

При проектировании реакторных систем типа «царга-тарелка» получены конструкции реакторных систем diazotирования и азосочетания, которые обеспечивают осуществление химических процессов с выполнением технологических ограничений. Однако, как показали дополнительные исследования, заданные конструкции реакторных систем получены с некоторым запасом технического ресурса, что объясняется необходимостью обеспечения работоспособности реакторной системы при отклонении неопределенных параметров от номинальных значений. При этом безусловное выполнение технологических ограничений по сравнению с требованием их вероятностного выполнения требует большего запаса технических ресурсов реакторных установок.

При проектировании принципиальных технологических схем гибкого производства азоксигментов рассматривались различные варианты. Так, на стадии отработки непрерывных технологических процессов diazotирования и азосочетания может использоваться автоматизированная установка получения азоксигментов общей производительностью 1000 т/год (рис. 1 а). Diazotирование в этой установке проводится непрерывно в 5-модульной реакторной системе diazotирования типа «царга-тарелка», в которую подается предварительно охлажденная солянокислая суспензия амина. Из реакторной системы diazotирования diazo-

соединение самотеком поступает в каскад реакторов азосочетания. Для более качественного проведения процесса сочетания осуществляется распределенная подача диазосоединения между реакторами азосочетания.

Как показывают расчеты, разработанная при помощи автоматизированной информационной системы [2] технологическая схема производства азопигментов (рис. 1 а) обладает достаточной эффективностью и обеспечивает приемлемый для реального производства выход и качество целевого продукта.

Такая установка синтеза азопигментов позволяет получать не только различные марки азокрасителей, но и осуществлять все важнейшие реакции тонкого органического синтеза, встречающиеся в производстве синтетических красителей, химикатов-добавок для полимерных материалов и др.

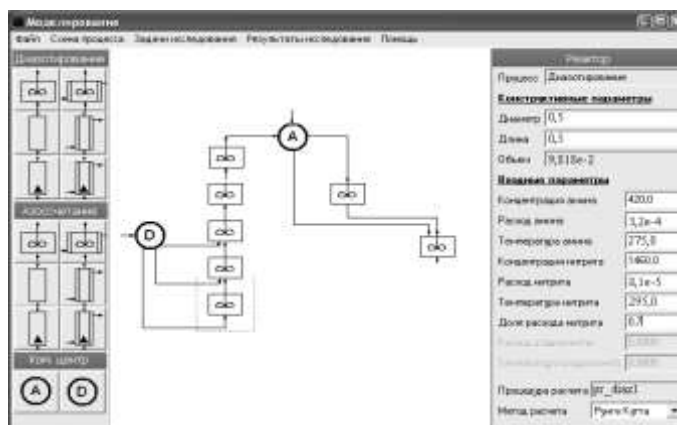
Обладая высокой степенью гибкости в смысле варьирования колористических параметров азопигментов, рассмотренная установка позволяет получать азопигмент только одной цветовой гаммы. В этом отношении выгодно отличается гибкая установка непрерывного синтеза азопигментов, представленная на рис. 1 б. В состав установки входят две модульные реакторные системы диазотирования типа «царга-тарелка» и четыре модульные реакторные системы азосочетания емкостного и трубного типов. Установка такой структуры позволяет одновременно набирать несколько марок азопигментов, различающихся по цвету.

Однако структура гибкой установки непрерывного синтеза азопигментов, изображенная на рис. 1 б, хотя и позволяет набирать несколько различных по цвету марок азокрасителей, обладает рядом недостатков. Один из них, наиболее существенный, заключается в сложности трубопроводных коммуникаций. Это сдерживает расширение производства на основе увеличения номенклатуры выпускаемой продукции, так как необходимость ввода новых реакторных систем повлечет еще большую сложность и запутанность технологических коммуникаций.

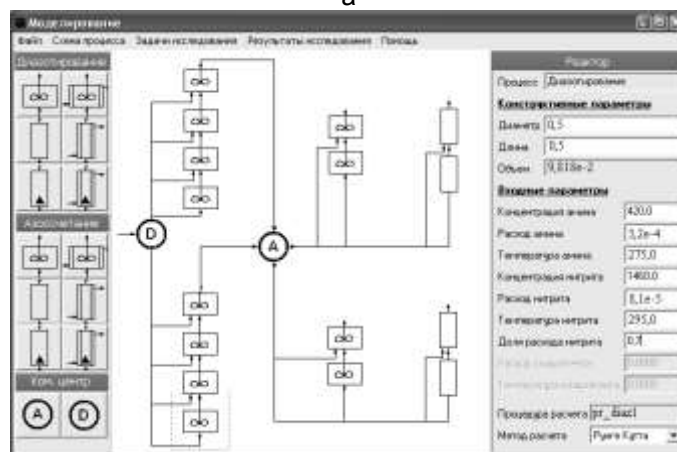
Тем не менее автоматизированная информационная система принятия решений в производстве органических полупродуктов и красителей позволяет синтезировать структуры реакторных установок производства органических полупродуктов и красителей любой сложности и рассчитать номинальный режим полученной технологической схемы.

В качестве примера в таблице приведены результаты расчета номинального режима для технологической схемы, изображенной на рис. 1 а.

Анализируя данные таблицы, можно заметить, что разработанная технологическая схема производства азопигментов (рис. 1 а) обладает достаточной эффективностью и обеспечивает приемлемые для реального производства выход и качество целевого продукта, что позволяет ее рекомендовать для промышленной реализации.



а



б

Рис. 1. Технологические схемы полупромышленной гибкой автоматизированной установки непрерывного синтеза азопигментов

## Определение технологической схемы diazotирования

Реакторная система diazotирования		
Входные данные для расчета		
Наименование величины	Значение	Размерность
Заданная производительность по сухому пигменту	1000	т/год
Число модулей	5	шт.
Объем модуля	0,098	м <sup>3</sup>
Температуры на входе в реакторную систему:		
суспензии амина	275	К
суспензии амина	295	К
раствора нитрита натрия		
Концентрации компонентов	420,0	моль/м <sup>3</sup>
на входе:	1460,0	моль/м <sup>3</sup>
суспензии амина		
раствора нитрита натрия		
Расходы на входе в реакторную систему:		
суспензии амина	$3,161 \cdot 10^{-5}$	м <sup>3</sup> /с
раствора нитрита натрия	$8,132 \cdot 10^{-5}$	м <sup>3</sup> /с
общий расход смеси	$3,981 \cdot 10^{-5}$	м <sup>3</sup> /с
Распределение нитрита по модулям:	0,71	доли
1-й	0,25	доли
2-й	0,04	доли
3-й	0,0	доли
4-й	0,0	доли
5-й		
Результаты расчета		
Концентрации основных компонентов в смеси:		
амина твердого	2,274	моль/м <sup>3</sup>
амина жидкого	0,015	моль/м <sup>3</sup>
дiazосоединения	319,6	моль/м <sup>3</sup>
diazосмол 1	0,98	моль/м <sup>3</sup>
diazосмол 2	0,64	моль/м <sup>3</sup>
нитрозных газов	0,018	моль/м <sup>3</sup>
Расчетная производительность по сухому пигменту	1001,2	т/год
Выход diazосоединения	98,2	%
Проскок амина	0,81	%
Содержание diazосмол	0,49	%
Содержание нитрозных газов	0,73	%

## Определение технологической схемы азосочетания

Реакторная система азосочетания		
Входные данные для расчета		
Число модулей	2	шт.
Объем модуля	0,581	м <sup>3</sup>
Концентрации компонентов на входе:		
диазосоединения	319,6	моль/ м <sup>3</sup>
азосоставляющей	310,0	моль/ м <sup>3</sup>
Расходы на входе в реакторную систему:		
диазосоединения	$3,981 \cdot 10^{-4}$	м <sup>3</sup> /с
азосоставляющей	$4,150 \cdot 10^{-4}$	м <sup>3</sup> /с
общий расход в реакторную систему	$1,660 \cdot 10^{-3}$	м <sup>3</sup> /с
Распределение диазосоединения по секциям:		
1-я	0,853	доли
2-я	0,147	доли
Кислотность среды в секциях:		
pH1	7,28	ед. pH
pH2	7,41	ед. pH
Результаты расчета		
Концентрации компонентов в смеси:		
азопигмента	79,80	моль/ м3
азосоставляющей	3,84	моль/ м3
диазосоединения	0,042	моль/ м3
диазосмол	0,705	моль/ м3
Выход азопигмента	99,12	%
Содержание диазосмол	0,86	%
Физико-колористические показатели:		
Основной тон	7,35	ед. сист. Рихтера
Насыщенность	3,4	ед. сист. Рихтера
Красящая способность	2,3	K/S
Укрывистость	24,4	г/м <sup>2</sup>
Прозрачность,	82,9	%
коэффициент контрастности		
Маслоемкость	75,6	г/100 г
Текучесть	17,9	мм
Растворимость	0,19	кг/м <sup>3</sup>

## ЛИТЕРАТУРА

1. Майстренко А.В. Компьютерное моделирование и проектирование процессов и установок получения синтетических красителей / А.В. Майстренко, Н.В. Игнатъева // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. Улан-Удэ, 2006. С. 76-81.

2. Игнатъева Н.В. Интерактивное моделирование и проектирование химико-технологических процессов и систем в условиях неопределенности (на примере реакторных установок синтеза азокрасителей) : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08, 05.25.05 : защищена 27.10.2006 : утв. 16.03.2007 / Игнатъева Наталья Владимировна. Тамбов, 2006. 208 с.

**Майстренко Александр Владимирович** –

кандидат технических наук, декан факультета «Нанотехнологии» Тамбовского государственного технического университета

**Майстренко Наталья Владимировна** –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Тамбовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 12.10.10, принята к опубликованию 28.10.10*

УДК 531.383

**В.Б. Никишин, В.С. Шорин, Д.Л. Лисицкий**

### **АЛГОРИТМЫ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ РОБОТОВ**

*Рассматриваются вопросы создания алгоритмов работы систем ориентации и навигации транспортных роботов на основе интегрирования информации спутниковых систем навигации, инерциальных датчиков, магнитометров и одометров. Показано, что разработанные алгоритмы позволяют существенно повысить надежность поступления и точность информации о состоянии робота.*

Ориентация, навигация, транспортный робот, инерциальный датчик

**V.B. Nikishin, V.S. Shorin, D.L. Lisitsky**

### **ALGORITHMS FOR ORIENTATION AND NAVIGATION SYSTEMS OF TRANSPORT ROBOTS**

*The article discusses problems of creating algorithms for orientation and navigation systems of transport robots using integrating data of satellite navigation systems, inertial sensors, magnetometers and odometers. The developed algorithms can significantly improve a reliability and an accuracy of information about the state of the robot.*

Orientation, navigation, the transport robot, the inertial gage

При реализации систем контроля подвижных объектов в настоящее время успешно применяют спутниковые системы навигации (СНС). В дифференциальном режиме СНС позволяют определять текущие координаты с погрешностью порядка нескольких сантиметров. Однако это далеко не всегда возможно из-за кратковременной потери связи со спутниками, что затрудняет реализацию систем управления движением роботов без использования дополнительной информации. Поэтому актуальной является задача построения и исследования систем ориентации и навигации транспортного робота, построенных на основе интеграции информации СНС с другими информационными средствами: инерциальными чувствительными элементами, магнитометрами, одометрами.

В основе алгоритмов функционирования платформенной системы ориентации (БСО) находятся кинематические уравнения, определяющие связь параметров ориентации с

угловыми скоростями подвижного объекта. Как известно, особое влияние на точность выработки оценок параметров ориентации оказывают систематические и случайные низкочастотные составляющие скоростей дрейфов гироскопических измерителей угловой скорости (ГИУС). Систематические составляющие скоростей дрейфов могут быть определены при предстартовой подготовке на неподвижном основании. Влияние случайных низкочастотных составляющих скоростей дрейфа компенсируется коррекцией. В условиях земного тяготения горизонтальная коррекция осуществляется по сигналам датчиков кажущихся ускорений. Азимутальная коррекция БСО на подвижном основании реализуется, как правило, на основе сигналов неинерциальных датчиков информации: астровизиров, магнитометров и т.п. Однако наличие в выходном сигнале ГИУС медленно изменяющейся составляющей скорости дрейфа приводит к появлению в оценках углов ориентации соответствующей ошибки. Поэтому оценивание и компенсация случайных низкочастотных составляющих скоростей дрейфа ГИУС средней и низкой точности в составе БСО подвижного объекта является важным моментом.

Известным способом оценивания погрешностей чувствительных элементов является включение их в состав оцениваемого вектора, однако не все компоненты данного вектора могут оказаться наблюдаемы.

Часто для описания низкочастотных составляющих скоростей дрейфа ГИУС используют модели в виде марковских процессов:

$$\dot{\omega}_{xi}^c(t) = -\omega_{xi}^c(t)/\tau_{xi} + \sigma_{xi}\sqrt{2\tau_{xi}} \cdot w(t), \quad (i=1, \dots, 3), \quad (1)$$

где  $w(t)$  – центрированный порождающий «белый шум» единичной интенсивности;  $\tau_{xi}$  – время корреляции;  $\sigma_{xi}$  – среднеквадратическое отклонение.

При наличии измерений по трем каналам (курс, тангаж, крен) обеспечивается полная наблюдаемость скоростей дрейфов ГИУС. При отсутствии измерений в азимутальном канале, как утверждается в [2], сохраняется возможность оценивания только двух скоростей дрейфов ГИУС. В [1] отмечается полная наблюдаемость всех скоростей дрейфов ГИУС и смещений нулей акселерометров, а также ряда других погрешностей датчиков первичной информации в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы, интегрированной с помощью фильтра Калмана с неинерциальными измерительными средствами, даже при отсутствии измерений в азимутальном канале. На наш взгляд, и первое и второе утверждения нуждаются в существенных уточнениях.

В качестве основы алгоритмов оценивания параметров ориентации используются кинематические уравнения Эйлера в следующем виде:

$$\dot{\psi} = (\hat{\omega}_{x2} \cos \gamma - \hat{\omega}_{x3} \sin \gamma) / \cos \theta; \quad \dot{\theta} = \hat{\omega}_{x2} \sin \gamma + \hat{\omega}_{x3} \cos \gamma; \quad \dot{\gamma} = \hat{\omega}_{x1} - (\hat{\omega}_{x2} \cos \gamma - \hat{\omega}_{x3} \sin \gamma) \operatorname{tg} \theta, \quad (2)$$

где  $\hat{\omega}_{xi}$  – формируемые по сигналам ГИУС с учетом переносных угловых скоростей оценки скорости вращения робота относительно системы координат, жестко связанной с Землей;  $\psi, \theta, \gamma$  – углы курса, тангажа и крена.

С учетом малости скоростей поступательного движения робота под переносными угловыми скоростями будем понимать проекции  $\Omega_{xi}$  скорости вращения Земли на оси чувствительности соответствующих гироскопов.

Представим ошибки оценок  $\hat{\omega}_{xi}$  в виде суммы низкочастотных составляющих  $\omega_{xi}^c$  и шумов  $w_{xi}^o$  ГИУС. Составив для системы (2) уравнения ошибок и дополнив их выражениями (1), получим модель наблюдаемой динамической системы в следующем виде:

$$\dot{X} = A(\omega, \alpha) X + GW, \quad (3)$$

где  $X = [\Delta\alpha, \omega^c]^T$ ,  $\Delta\alpha = [\Delta\psi, \Delta\theta, \Delta\gamma]^T$ ,  $\omega^c = [\omega_{x1}^c, \omega_{x2}^c, \omega_{x3}^c]^T$  – вектор состояния;  $G$  – матрица шумов;  $W$  – вектор нормированных случайных воздействий, представляющих собой процессы типа «белый шум»;  $\alpha = [\psi, \theta, \gamma]^T$ ;

$$A(\omega, \alpha) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \psi} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \theta} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \gamma} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \omega_{x1}} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \omega_{x2}} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \omega_{x3}} \\ \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \psi} & \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \theta} & \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \gamma} & \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \omega_{x1}} & \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \omega_{x2}} & \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \omega_{x3}} \\ \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial \psi} & \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial \theta} & \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial \gamma} & \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial \omega_{x1}} & \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial \omega_{x2}} & \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial \omega_{x3}} \\ \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \psi} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \theta} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \gamma} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \omega_{x1}} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \omega_{x2}} & \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \omega_{x3}} \\ 0 & 0 & 0 & 1/\tau_{x1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\tau_{x2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\tau_{x3} \end{bmatrix} \cdot \quad (4)$$

Полученная система (3) линейна относительно входящих в нее погрешностей. К ней можно применить процедуру оптимальной фильтрации Калмана (ОФК), принимая в качестве измерений разности соответствующих оценок параметров ориентации, сформированных по сигналам ГИУС на основе выражений (2), акселерометров  $\vec{w}_x^* = [w_{x1}^* \ w_{x2}^* \ w_{x3}^*]^T$  (магнитометров  $\vec{T}_x^* = [T_{x1}^* \ T_{x2}^* \ T_{x3}^*]^T$ ).

Применив процедуру ОФК, получим следующие выражения в матричной форме:

$$Y = CX + V; \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\dot{\hat{X}} = A(\omega, \alpha) \hat{X} + U_\phi + K(Y - C\hat{X}), \quad (7)$$

где  $Y$  – вектор измерения;  $C$  – матрица измерения;  $V$  – вектор измерительных шумов;  $R$  – ковариационная матрица, характеризующая вектор  $V$ ;  $K$  – матрица коэффициентов передачи фильтра Калмана;  $U_\phi$  – вектор управления.

Для оценки эффективности описанных алгоритмов проведено математическое моделирование работы БСО при угловом движении основания: при  $0 < t < 300$  с:  $\psi = 10^\circ$ ,  $\theta = 0$ ,  $\gamma = 0$ ,  $v_{x1} = 0$ , при  $300 < t < 800$  с:  $\psi = 10 + 5 \cdot \sin(0,46 \cdot \pi \cdot (t - 300))^\circ$ ,  $\theta = 0$ ,  $\gamma = 0$ , при  $t > 400$  с  $v_{x1} = 5$  м/с. При этом учитывались погрешности датчиков, описанные в паспорте прибора ADIS16405. Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 1 - 4.

Для счисления координат робота сигналы датчиков пересчитываются к осям горизонтального географического сопровождающего трехгранника  $O\zeta_1\zeta_2\zeta_3$  с началом координат в точке старта робота:

$$[\hat{V}_{\zeta_1} \ \hat{V}_{\zeta_2} \ \hat{V}_{\zeta_3}]^T = A^T [\hat{V}_{x1} \ 0 \ 0]^T; \ \hat{A} = \hat{A}_\gamma \hat{A}_\theta \hat{A}_\psi. \quad (8)$$

После этого интегрируются уравнения движения центра масс (точки установки трехкомпонентного измерителя кажущегося ускорения) робота с введенными в них членами коррекции, формируемыми по сигналам GPS/ГЛОНАСС и датчиков пути и скорости (ДПС):

$$d\hat{\zeta} / dt = \hat{V} + k_1(\bar{\zeta}^* - \hat{\zeta}), \quad (9)$$

где  $\bar{\zeta}_v^*$  и  $\bar{\zeta}^*$  – векторы координат местоположения объекта, определяемые по сигналам ДПС и приемника глобальных систем позиционирования, соответственно;  $\hat{V}$  – вектор оценок скоростей поступательного движения робота. При наличии в БЦВМ электронной карты местности и сигналы соответствующих датчиков, опознающих маркеры на местности, оценки координат корректируются в результате привязки траектории движения робота к электронной карте.



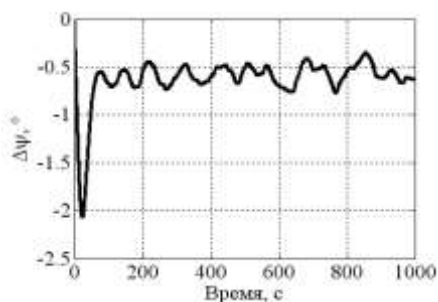


Рис. 1. Погрешность оценивания угла курса с ОФК в контуре коррекции

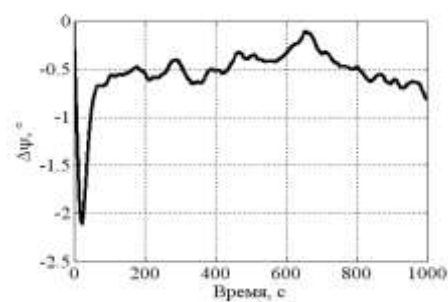


Рис. 2. Погрешность оценивания угла курса без ОФК в контуре коррекции

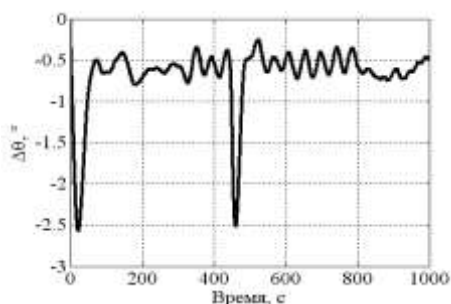


Рис. 3. Погрешность оценивания угла тангажа с ОФК в контуре коррекции

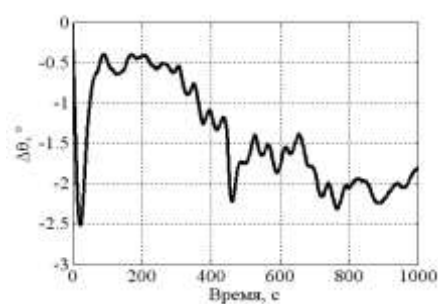


Рис. 4. Погрешность оценивания угла тангажа без ОФК в контуре коррекции

Широта и долгота местоположения робота определяются по выражениям:

$$\varphi = \varphi_0 + \xi_1 / R; \quad \lambda = \lambda_0 + \xi_3 / (R^* \cos \varphi), \quad (10)$$

где  $\varphi_0$  и  $\lambda_0$  – широта и долгота точки старта;  $\xi_1$  и  $\xi_3$  – декартовы координаты этой же точки.

Результаты математического моделирования процесса навигации с учетом параметров реальных датчиков приведены ниже в виде зависимости погрешности измерения координат центра масс робота от пройденного пути.

Как показывает математическое моделирование, применение алгоритмов интегрирования информации СНС с информацией ряда других датчиков, устанавливаемых на борту робота, позволяет существенно повысить точность и надежность определения положения объекта.

Работа выполнена при поддержке гранта МОН РФ № 02.740.11.0482.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андропов А.В. Повышение точности определения местоположения внутритрубных инспекционных снарядов за счет использования спутниковых радионавигационных систем : автореф. дис. канд. техн. наук / А.В. Андропов. Красноярск, 2006.
2. Картунов В.И. Анализ процессов коррекции БИНС / В.И. Картунов, Г.А. Проскура // Сб. тр. XIV С-Петербур. Междунар. науч. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., 2007. С.223-225.

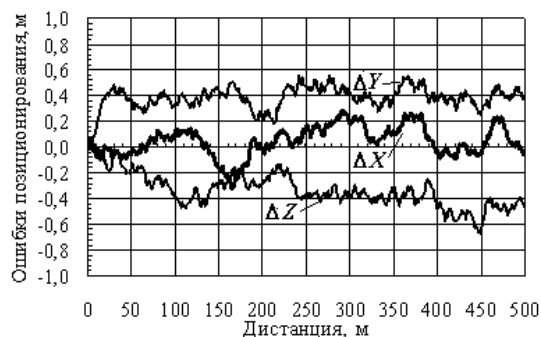


Рис. 5. Погрешности измерения координат центра масс

3. Плотников П.К. Об устойчивости алгоритмов определения углов поворотов объекта по сигналам гироскопической бесплатформенной системы ориентации / П.К. Плотников, С.А. Лючев // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1991. №10. С43-49.

**Никишин Владимир Борисович –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета

**Шорин Владимир Сергеевич –**

аспирант кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета

**Лисицкий Денис Леонтьевич –**

аспирант кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 05.10.10, принята к опубликованию 20.10.10*

УДК 004.896

**И.О. Проталинский, И.А. Щербатов**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Для повышения эффективности управления робототехническими системами промышленного назначения синтезирован алгоритм группового управления роботами с применением мультиагентной технологии. В работе описан алгоритм группового управления и показана его практическая реализация. Эффективность синтезированного алгоритма проверена с применением методов имитационного моделирования.*

Мультиагентная система, имитационное моделирование, робототехническая система, управление групповым поведением роботов

**I.O. Protalinskiy, I.A. Sherbatov**

## **INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF GROUP MANAGEMENT ROBOT USING SIMULATION**

*For control efficiency increase robotics industrial function systems synthesise algorithm of group control by robots with application multiagent technologies. In work the algorithm of group management is described and its practical realisation is shown. Efficiency of the synthesised algorithm is checked up with application of methods of imitating modelling.*

Multiagent system, imitating modelling, robotics system, control of group behaviour of robots

Мультиагентные системы (МАС) являются интенсивно развивающимся направлением создания и применения интеллектуальных систем имитационного моделирования. Наиболее важной задачей исследования в этой области является создание моделей, имитирующих работу агента во внешней среде и взаимодействия агентов между собой. Перспективным направлением развития и применения МАС являются промышленная робототехника в сфере судостроения и судоремонта. Основные проблемы, которые возникают у специалистов этой области, – это относительно большой размер объекта, на котором проводятся работы, проверка качества произведенных работ и оценка затрачиваемого количества человека/часов на решение одной задачи. Использование промышленных роботов с адаптивным управлением не решает все эти задачи из-за трудности быстрого и адекватного реагирования на состояние внешней среды, что не позволяет повысить качество производимых сварочных работ и сократить время выполнения одной задачи. Для решения поставленных задач нами разработан алгоритм управления группой роботов для проведения сварочных работ.

Целями представленной работы являются синтез и оценка эффективности алгоритма управления группой сварочных роботов в единой рабочей зоне на основе системы имитационного моделирования.

Предлагаемый алгоритм состоит из нескольких основных этапов построения последовательности решаемых задач и распределения задач между роботами.

Первый этап при создании адаптивного алгоритма заключается в определении рейтинга приоритета выполнения задач  $Z_1, \dots, Z_n$  по критериям, которые выбираются отдельно для каждой новой ситуации.

На втором этапе формулируется коалиция  $L$  возможных партнеров для задач  $Z_i$  с наименьшим влиянием на него других задач. При этом предполагается, что задача  $Z_m$  принадлежит множеству  $L$ , если задачи  $Z_m$  и  $Z_i$  не взаимодействуют и  $Z_m$  и  $Z_i$  не могут быть выполнены только одним роботом. Составляем множество задач  $Z = \{Z_1 \dots Z_i\}$ , разбиваем их на подмножества концептов, выполняемых каждым из роботов  $A_i = \{Z_i \in Z | A_i - \text{выполняется } A_i\}$ .

Далее составим множество  $A$  с включением в него роботов, находящихся в одной рабочей зоне, как членов этого множества  $A = \{A_1, \dots, A_m\}$ .

Третий шаг: наполнение коалиции  $L$  задачами  $Z_1, \dots, Z_n$ , удовлетворяющими условиям:

$$L_i = \{Z_j \in Z | Z_j(k_n, \dots, k_m) \cap L_{i-1}(k_p, \dots, k_q) = \emptyset \mid Z_j \in A_k; L_{i-1} \in \alpha; \alpha \subset A; A_k \cap \alpha \neq Z_j\}$$

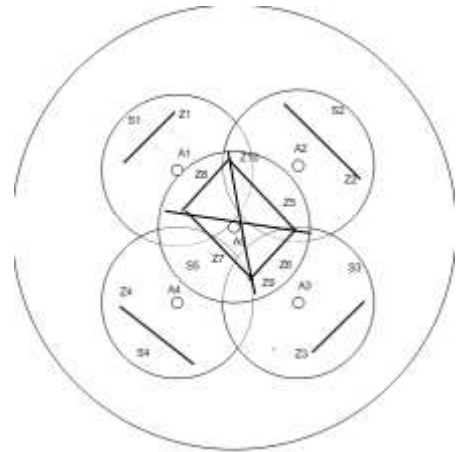


Рис. 1. Рабочая зона

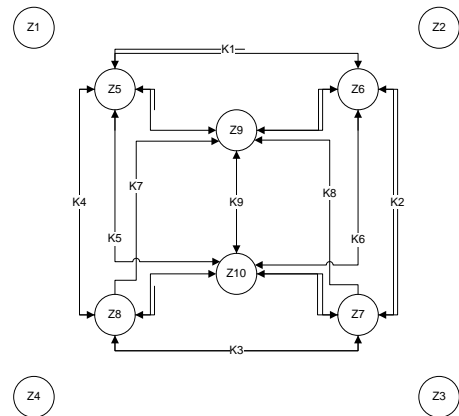


Рис. 2. Когнитивная карта для анализа взаимодействия в мультиагентной системе

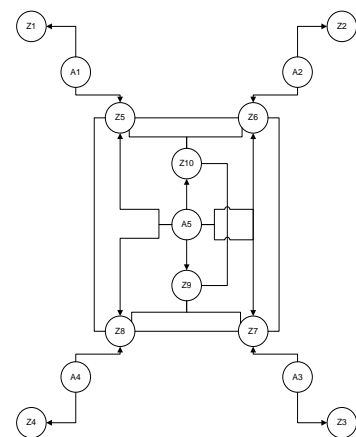


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели сварочных робот группы роботов

Полученная коалиция  $L$  является динамической структурой, условием выхода из которой для задачи  $Z_i$  является ее успешное выполнение. На место выполненной задачи  $Z_i$  возможен вход в коалицию  $L$  новой задачи  $Z_k$  при выполнении необходимых условий. При выполнении представленных условий на каждой итерации возникает ситуация, при которой задачи  $Z_1, \dots, Z_n$  будут выполнены.

Необходимая имитационная модель для проверки эффективности алгоритма управления группой сварочных роботов в единой рабочей зоне состоит из двух основных компонентов: рабочая зона и система промышленных роботов. Рабочая зона – это множество координат на плоскости, подмножеством которого является координаты сварочных швов, представляемых в модели как задачи. Группа промышленных роботов – это роботизированная система, состоящая из сварочных роботов с единой системой управления и распределения выполняемых задач.

Роботизированная система, состоящая из нескольких роботов, преобразуется в мультиагентную систему, что позволяет сократить вычислительные мощности, требуемые для решения поставленных задач и оптимизировать процесс выдачи задания каждому из роботов.

Реализация модели рабочей зоны осуществляется на основе теории когнитивных моделей. Данный выбор обусловлен относительно простым определением взаимосвязей между задачами, что существенно сокращает время разработки. Также при построении когнитивной модели используется алгоритм адаптации модели, позволяющий определить количественные и качественные показатели. Дополнительным преимуществом является возможность построения относительно простой в исполнении когнитивной карты, и по мере накопления знаний о процессах управления группой промышленных роботов становится возможной более детальная «проработка» модели рабочей зоны.

Рассмотрим пример построения имитационной модели сварочного процесса группой роботов, включающей пять промышленных роботов для проведения сварочных работ  $A_1, A_2, \dots, A_5$ , каждый из которых работает в своей рабочей зоне  $S_1, S_2, \dots, S_5$ . Эти зоны являются частями общей зоны  $S$  (рис. 1). Также заданы задачи  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{10}$ , состоящие в создании девяти сварочных швов.

Построим когнитивную карту, отображающую концепты и взаимосвязи между ними (рис. 2). При построении карты рабочей зоны каждая из задач представляется как концепт когнитивной карты.

При создании когнитивной карты рабочей зоны и совмещении с мультиагентной системой промышленных роботов, структуру имитационной модели получаем имитационную модель сварочного процесса группой промышленных роботов (рис. 3). Модель представлена функциональным графом, в котором вершины являются базисными структурами, направленные дуги представляют последовательность управляющих команд робота для выполнения задачи. Ненаправленные дуги показывают отношения задач.

Для оценки эффективности управления группой роботов с использованием алгоритма управления группой сварочных роботов в одной рабочей зоне сравним функционирование объекта в двух режимах: адаптивный метод и алгоритм группового управления роботами.

В первом случае возникают потери по сравнению с «идеальным» управлением, которые вызваны изменением входных управляющих воздействий. Величину отклонения от «идеального» значения  $\xi_1$  этого режима можно выразить соотношением

$$\xi_1 = \int_0^{\tau_m} (I_1 - I^*)^2 dt,$$

где  $\tau_m$  – время, в течение, которого проводится имитационное моделирование;  $I_1$  – значение критерия оптимальности управления при реализации адаптивных алгоритмов;  $I^*$  – оптимальное значение критерия при идеальном управлении.

При управлении, основанном на предложенном алгоритме, также возникают потери по сравнению с «идеальным» управлением, которые вызваны неточностью математической

модели объекта. Таким образом, отклонение при управлении роботехнической системы выразится соотношением

$$\xi_2 = \int_0^{T_m} (I_2 - I^*)^2 dt,$$

$I_2$  – значение критерия при управлении по предложенному алгоритму.

Тогда степень повышения эффективности функционирования объекта управления  $\Theta$  будет определяться соотношением

$$\Theta = \frac{\xi_1}{\xi_2} * 100\%.$$

Здесь  $\Theta$  – эффективность управления группой роботов алгоритмом управления группой сварочных роботов в одной рабочей зоне по сравнению с режимом адаптивного управления.

Для определения эффективности управления группой роботов спроектирована система имитационного моделирования (рис. 4).

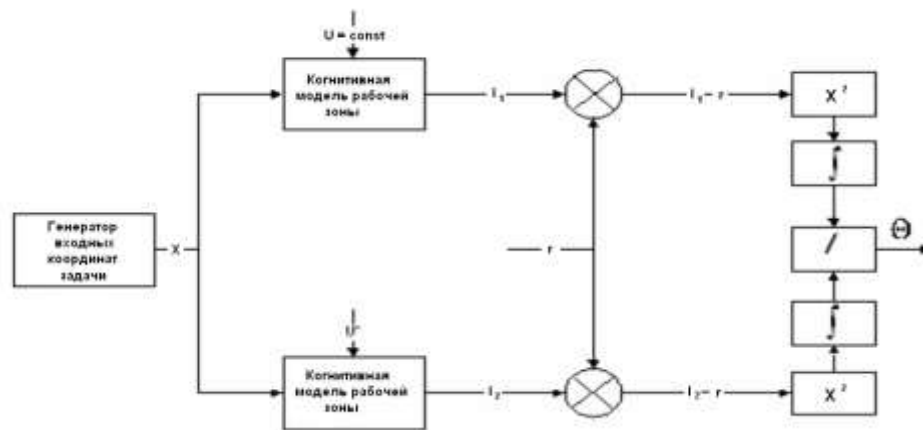


Рис. 4. Структурная схема системы имитационного моделирования

При использовании представленной системы имитационного моделирования нами выявлено повышение эффективности выполнения сварочных работ предложенным методом по сравнению с адаптивным методом управления группой роботов от 2,8 до 3,2 %.

Таким образом, результатом работы является построенная имитационная модель рабочей зоны группы сварочных роботов. На основе этой модели предложен алгоритм группового управления робототехническими системами для сварочных роботов. Имитационное моделирование показало эффективность алгоритма управления группой сварочных роботов в единой рабочей зоне. Синтезированный алгоритм может найти применение для решения задач сварки на объектах с большим размером (в отношении с рабочей зоной одного робота), таких как судостроение и судоремонт.

#### **Проталинский Игорь Олегович –**

студент 5 курса специальности «Управление и информатика в технических системах» Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

#### **Щербатов Иван Анатольевич –**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Вычислительная техника и электроника» Астраханского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 14.10.10, принята к опубликованию 28.10.10*

УДК 681.51.015: [69: 519.711.3]

**О.М. Проталинский, И.А. Щербатов, И.О. Беляев**

## **ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ СТАДИИ ПРОЦЕССА КЛАУСА**

*Представлена гибридная методика обучения нейронных сетей применительно к нейросетевым системам управления, которая включает классические градиентные методы, а также модифицированный генетический алгоритм для корректировки весов. Рассматривается применение этой методики для обучения модели нейрорегулятора, применительно к классификации каталитической стадии процесса Клауса. Сформулированы выводы о скорости сходимости предложенной методики.*

Нейронные сети, градиентный метод, генетический алгоритм, процесс Клауса

**O.M. Protalinsky, I.A. Sherbatov, I.O. Belyaev**

## **HYBRID METHOD OF TRAINING NEURAL NETWORKS FOR CLASSIFICATION CATALYTIC STAGE OF CLAUS PROCESS**

*Presented a hybrid technique of neural networks as applied to neural network control systems. Technique includes the classic gradient methods, as well as a modified genetic algorithm for adjusting weights. Considers the application of this technique to train the model neuroregulator, for classification of catalytic stage Claus process. The conclusions about the rate of convergence of the proposed methodology.*

Neural networks, gradient method, genetic algorithm, Claus process

### **Введение**

Существует множество решений задачи автоматической классификации на основе теории нейронных сетей. Однако эти решения не являются достаточно полными и эффективными. Прежде всего, методы, основанные на нейросетевых моделях, не обеспечивают полной гарантии правильной классификации объекта, хотя вероятность успешного результата довольно высока. Кроме того, в теории нейронных сетей актуальным является выбор оптимальной структуры нейронной сети и алгоритма ее обучения.

Рассмотрим применение теории нейронных сетей на примере систем автоматического управления (рис. 1). Главными особенностями объекта управления являются нестационарность и отсутствие быстротекущих физико-химических процессов. В качестве управляющего устройства рассмотрим нейросетевой регулятор.

От нейросетевого регулятора на вход объекта поступает управляющий сигнал. Помимо управляющего воздействия, к объекту приложено возмущающее воздействие, которое изменяет состояние объекта.

На вход нейросетевого регулятора подается задающее воздействие, содержащее информацию о требуемом значении выходного сигнала. Отметим, что нейросетевой регулятор находится в отрицательной обратной связи с объектом управления.

Целью данной статьи является построение методики обучения нейронных сетей, построенной на основе комбинации классических градиентных методов и генетических алгоритмов. Эта методика

будет применена для классификации каталитической стадии процесса Клауса.



Рис. 1. Блок-схема системы автоматического управления

### Описание метода Клауса

Сера относится к основным продуктам химической промышленности. До середины 50-х годов XX в. основное ее количество добывалось как полезное ископаемое в виде самородной серы или из пирита, в виде серной кислоты. Во второй половине XX века произошло бурное развитие производства газовой серы из сероводорода, получаемого в виде попутного газа при обессеривании природного газа и нефтепродуктов (в установках очистки растворами этаноламинов). Полученная таким образом сера является очень чистой и пригодной для широкого использования, т.к. не уступает сере природного происхождения.

Процесс получения элементарной серы из сероводородсодержащих газов предложен лондонским химиком Карлом Фридрихом Клаусом в 1883 году и заключался в том, что сероводородсодержащий газ сжигали в реакторе в соответствии со стехиометрическим уравнением (1) в присутствии железорудного катализатора:



В 1937 г. оригинальный процесс Клауса усовершенствован (рис. 2), что позволило увеличить объемы переработки сероводородных газов. С этого момента процесс проводили в две стадии. На первой стадии треть сероводорода сжигалась до сернистого ангидрида (термическая стадия процесса – высокотемпературное окисление). Затем оставшаяся часть сероводорода окислялась полученным сернистым ангидридом в присутствии железорудного катализатора до серы (каталитическая стадия процесса – низкотемпературное окисление).

Функционирование каталитической стадии процесса Клауса определяется следующими выходными координатами: 1) производительностью установки  $Q$ ; 2) степенью конверсии сероводорода в серу  $Y_C$ ; 3) суммой концентраций серосодержащих соединений, выбрасываемых в атмосферу; сроком службы катализатора  $T$ .

Входными координатами этого технологического процесса являются: 1) температура  $T_G$ , давление  $P_G$ , расход  $F_G$  кислого газа; 2) температура  $T_A$ , давление  $P_A$ , расход  $F_A$  атмосферного воздуха; 3) качество кислого газа  $GQ$ ; 4) качество атмосферного воздуха  $AQ$ .

Температуры, давления и расходы технологических потоков могут быть измерены традиционными методами. Кислый газ является продуктом установки аминовой очистки, и в ряде случаев определение его состава невозможно, что затрудняет количественное определение его характеристик.

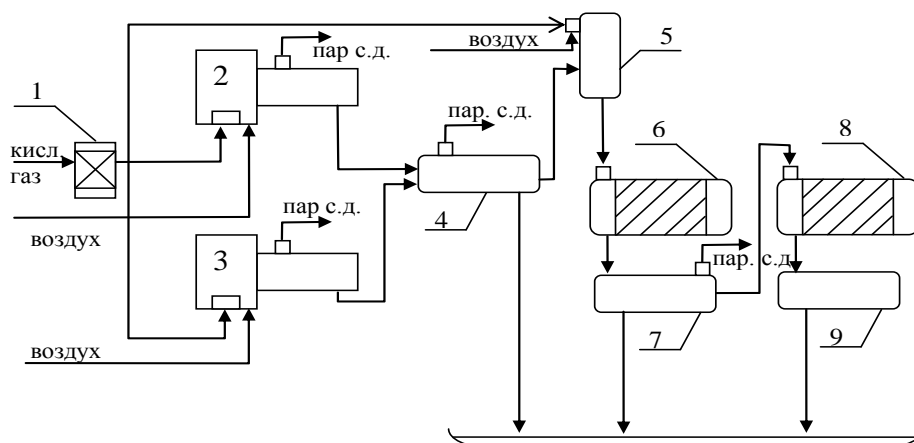


Рис. 2. Упрощенная схема установки получения серы методом Клауса:  
 1 – сепаратор кислого газа; 2 и 3 – реакционные печи (реактор-генератор со встроенным котлом-утилизатором); 4 – котел-утилизатор; 5 – подогреватель кислого газа; 6 и 8 – каталитические конвертеры; 7 и 9 – конденсаторы серы; 10 – серная яма суточного хранения

### Выбор архитектуры

В [1] автором рассмотрен выбор оптимальной структуры нейронной сети. Полученные выводы будут использованы при построении нейросетевой архитектуры для рассматриваемого нейрорегулятора. В качестве базовой архитектуры используется трехслойный полносвязный персептрон. При этом количество нейронов на скрытом слое не должно превышать удвоенного количества входных сигналов.

### Гибридная методика обучения

Данная работа посвящена гибридной методике обучения нейронных сетей применительно к нейросетевым системам управления. Суть ее заключается в использовании классических градиентных методов с генетическим алгоритмом, позволяющим обеспечить более быструю сходимость классического метода.

### Градиентный метод

Наиболее известным и широко используемым методом обучения нейронных сетей является алгоритм обратного распространения ошибки с применением сигмоидальных нейронов. Этот метод является одним из градиентных методов обучения нейронных сетей. Тем не менее он обладает рядом недостатков, главным из которых является довольно большая длительность обучения. Методика, предложенная в этой статье, позволяет сократить ее с помощью применения генетических алгоритмов.

Введем следующие обозначения:

- $x^{(k)} (x_0^{(k)}, x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$  – входной вектор обучающей выборки номер  $k$  на  $n$  входов,
- $y^{(k)} (y_0^{(k)}, y_1^{(k)}, \dots, y_m^{(k)})$  – соответствующий входному вектору выходной сигнал на  $m$  выходов,
- $d^{(k)} (d_0^{(k)}, d_1^{(k)}, \dots, d_m^{(k)})$  – правильное значение выходного сигнала, ставящееся в соответствие входному сигналу  $x^{(k)}$ ,
- $w = (w_{ij})$  – множество весов нейронной сети,

Мера ошибки нейронной сети, где  $p$  – общее количество примеров в обучающей выборке [3], может быть вычислена как

$$E = 1/2 \sum_{k=1}^p (y^k - d^k)^2, \quad (2)$$

Так как обучающая выборка остается постоянной, можно рассматривать зависимость этой целевой функции от заданной архитектуры.



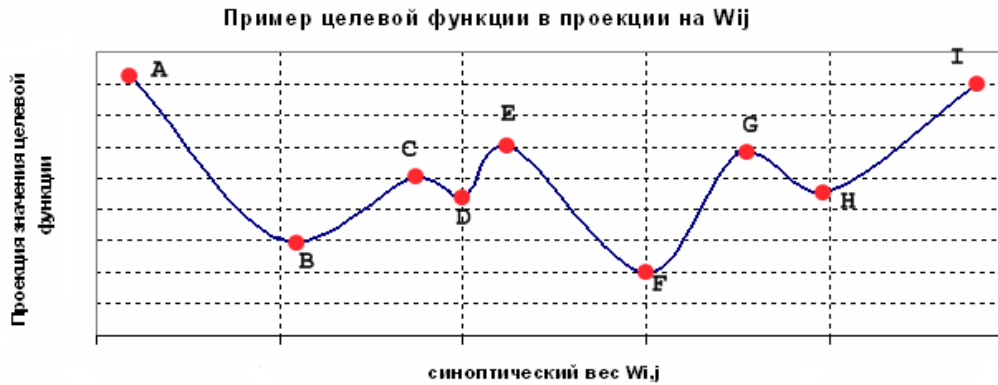


Рис. 3. Схематичное представление проекции целевой функции на один из элементов архитектуры нейронной сети – синаптический вес  $W_{i,j}$

Задача обучения нейронной сети, таким образом, сводится к задаче минимизации функции ошибки, определенной в многомерном пространстве. При использовании классических градиентных методов гарантированно можно определить локальный минимум целевой функции, что не позволит оптимально обучить нейронную сеть.

Общую природу попадания в локальный минимум можно прояснить, используя проекцию целевой функции (рис. 3). Рассмотрим более подробно пошаговый алгоритм обучения градиентным методом [2] на основе представленной блок-схемы (рис. 4):

При выборе положения начальной точки в блоке 1 необходимо выбрать начальное значение аргумента (синаптического веса  $W_{i,j}$ ). Как правило, в качестве начальной точки выбирается случайное значение в интервале  $[-1, 1]$ .

При выполнении блока 3 движение в многомерном пространстве происходит в направлении минимизации целевой функции задаваемой градиентом.

При стабилизации целевой функции постепенное уменьшение шага гарантирует, что алгоритм сойдется в одном из минимумов целевой функции. Такой подход не дает гарантии, что найденный минимум окажется глобальным.

Представленную проекцию функции можно условно разбить на 4 интервала, каждый из которых имеет локальный минимум:  $[A,C]$ ;  $[C,E]$ ;  $[E,G]$ ;  $[G,I]$ . На практике целевая функция может иметь гораздо больше подобных интервалов, но их количество конечно. Вне зависимости от выбора точки интервала на первом этапе, алгоритм сойдется в одном из окрестных заданному интервалу локальных минимумов.

### Генетический алгоритм

Для решения поставленной задачи предлагается использовать специализированный генетический алгоритм, применяются 3 базовые операции: селекция, скрещивание и мутация. Множество  $w = (w_{ij})$  можно рассматривать как хромосому, т.к. хромосома представляет собой неразрывный массив независимых значений; при выборочном попарном скрещивании различных хромосом можно применять классические механизмы скрещивания и мутации отдельных генов на случайные значения в заданном диапазоне.



Рис. 4. Блок-схема градиентного метода

Во время селекции происходит отсев хромосом, обладающих худшими значениями оценочной функции. В качестве оценочной функции будем использовать меру ошибки нейронной сети. Сходимость генетического алгоритма и градиентного метода позволяет утверждать, что и представленная методика также обладает свойством сходимости.

### Результаты эксперимента

Предложенная методика применена в обучении модели нейрорегулятора для классификации каталитической стадии процесса Клауса. Эксперимент проводился на компьютере с характеристиками: Intel Core 2Duo processor T5500(1,66 GHz, 667 MHz FSB, 2 MB L2 cache), 1 GB DDR2. Результаты представлены на графике (рис. 5).

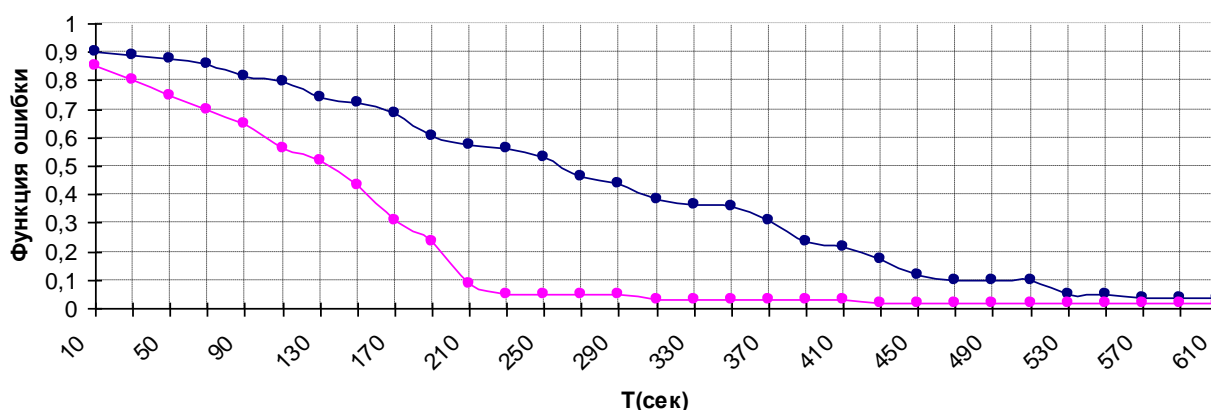


Рис. 5. Скорость сходимости градиентного метода и предложенной методики

### Выводы

Представленная методика позволяет уменьшить время сходимости по отношению к градиентным методам. Благодаря эволюционизму генетического алгоритма будет осуществлен больший охват значений синоптических весов и их комбинаций. Однако он обладает недостатками: для его реализации нужны большие вычислительные мощности. Но при использовании многопоточности на многопроцессорных вычислительных машинах эта проблема не чувствуется так остро.

Предложенную методику планируется применить при разработке программы для ЭВМ AdaptNNC, позволяющей моделировать адаптивные нейрорегуляторы для задач автоматического управления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев И.О. Выбор характеристик скрытого слоя нейросетевой модели в задачах классификации / И.О. Беляев // Информационные технологии будущего и современного электронного обучения. Астрахань, 2009. С. 275.
2. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. М.: Горячая линия-Телеком, 2002. 382 с.
3. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.

### Проталинский Олег Мирославович –

доктор технических наук, профессор, проректор по информатизации Астраханского государственного технического университета

**Щербатов Иван Анатольевич –**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Вычислительная техника и электроника» Астраханского государственного технического университета

**Беляев Игорь Олегович –**

аспирант кафедры «Прикладная информатика в экономике» Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 08.10.10, принята к опубликованию 27.10.10*

УДК 629.7.05.001

**А.А. Большаков, Д.Л. Лисицкий**

### **ОДИН ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ**

*Рассматривается управление мобильным роботом при движении, требующем объезда препятствий местности. Задача решается в рамках структуры, позволяющей декомпозировать систему управления на две последовательно включенные подсистемы, одна из которых формирует программную траекторию, а вторая ее отслеживает. Синтезирован алгоритм выбора программного управления.*

Программное управление, мобильный робот, препятствия, алгоритм

**A.A. Bolshakov, D.L. Lisitsky**

### **ONE METHOD OF MOBILE ROBOT MOTION CONTROL**

*The article discusses the motion control of mobile robot that goes around obstacles. There is considered the structure of a control system which allows separating it into two subsystems. The one of subsystems creates a program trajectory and another controls it. The article presents a synthesized algorithm of program control.*

Programmed control, the mobile robot, obstacles, algorithm

В настоящее время интенсивно развивается раздел робототехники, занимающийся созданием мобильных роботов. Однако создание роботов, уверенно перемещающихся даже по ровной поверхности, на которой имеются непреодолимые для них препятствия, пока не удалось по ряду причин, в том числе и из-за несовершенства алгоритмов управления. Поэтому разработка алгоритмов управления мобильных роботов является актуальной задачей.

Пусть необходимо, чтобы робот переместился из точки  $A$  в точку  $B$  горизонтальной плоскости (рис. 1), по траектории, минимально отклоняющейся от прямой, соединяющей эти точки, причем перемещение по прямой линии невозможно из-за препятствий произвольной формы. Для ясности дальнейших рассуждений предположим, что препятствие сплошное и несимметричное относительно прямой  $AB$  (рис. 1).

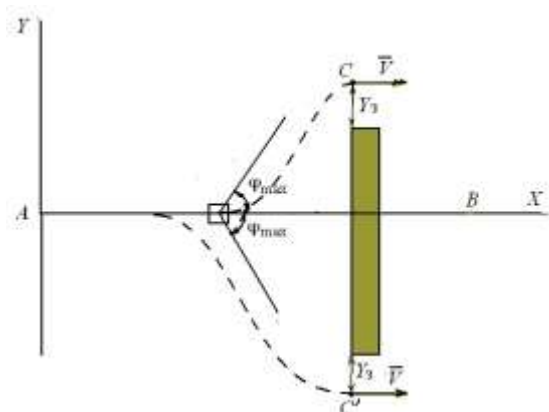


Рис. 1. Иллюстрация постановки задачи

Робот может огибать препятствие, обходя его с разных сторон, однако одно из направлений обхода будет требовать большего отклонения от прямой  $AB$  и, соответственно, должно быть исключено. Кроме того, в точке траектории, наиболее удаленной от прямой  $AB$  (точки  $C$  и  $C'$  на рис. 1), вектор скорости объекта должен быть ей параллелен и между роботом и препятствием должно оставаться некоторое заданное расстояние ( $Y_3$ ).

Для обнаружения препятствий местности на корпусе робота устанавливается специальный датчик. Им может являться лазерный дальномер с лучом, сканирующим в горизонтальной плоскости (ЛДС), угол сканирования которого равен  $2\varphi_{\max}$ , причем  $\varphi_{\max}$  не меньше максимального угла,

который может составлять траектория движения робота с прямой  $AB$ . Предположим, что ось симметрии сектора сканирования луча ЛДС параллельна прямой  $AB$ , а угол отклонения луча ЛДС от оси симметрии сектора  $\varphi$  изменяется дискретно с интервалом  $\Delta\varphi$  (рис. 1). Дальномер при каждом  $i$ -м измерении определяет угол наклона луча  $\varphi_i$  и расстояние до препятствия  $l_i$ , что позволяет вычислить координаты видимых дальномером точек препятствия в связанной с объектом системе координат. Всего за полупериод сканирования будет получена информация о расстоянии до  $k = (2\varphi_{\max}/\Delta\varphi) + 1$  точек препятствия. На корпусе робота установлены также два лазерных дальномера с неподвижными лучами, измеряющие расстояние от робота до препятствий в направлении, перпендикулярном прямой  $AB$ .

Положение центра масс робота в неподвижной СК  $AXY$  (рис. 1) производные этих координат и ориентация робота в этой СК определяются с помощью комплексной инерциальной системы навигации и ориентации, корректируемой по показаниям дифференциальных GPS-датчиков.

Для реализации системы воспользуемся структурой (рис. 2, 3), описанной в [1], которая позволяет разделить ее на две последовательно включенные подсистемы «модель-вычислитель программного управления (ВПУ)» и «объект-регулятор». Под моделью в этом случае понимается упрощенная математическая модель движения центра масс робота. Подсистема «модель-ВПУ» формирует программную траекторию, а подсистема «объект-регулятор» ее отслеживает.

Предположим, что продольная составляющая скорости центра масс робота стабилизируется специальным регулятором и поэтому постоянна. Тогда упрощенную математическую модель движения центра масс робота можно записать как кинематические дифференциальные уравнения плоского движения материальной точки:

$$dY_M/dt = V_{yM}; \quad dV_{yM}/dt = gn_y; \quad dX_M/dt = V_{xM} = const, \quad (1)$$

где  $Y_M, X_M$  – координаты упрощенной модели объекта в системе координат  $AXY$ ;  $V_{xM}, V_{yM}$  – соответственно продольная и поперечная составляющие скорости упрощенной модели;  $n_y$  – поперечная перегрузка модели;  $g$  – ускорение силы тяжести. В (1)  $X_M, Y_M, V_{xM}, V_{yM}$  – координаты,  $n_y$  – управление, которое далее будем называть программным управлением.

На координаты и управления упрощенной модели робота наложены ограничения:

$$-V_{y\max} \leq V_{yM} \leq V_{y\max}; \quad -n_{y\max} \leq n_y \leq n_{y\max}. \quad (2)$$

Первое из неравенств (2) ограничивает угол наклона программной траектории, второе – радиус кривизны траектории. Величины ограничений следует выбирать так, чтобы динамические свойства робота позволяли ему отслеживать «движение» модели.

Необходимо синтезировать алгоритм выбора программного управления  $n_y$ , который определяет направление обхода препятствия и переводит объект (1, 2) из произвольного начального состояния в точку, расположенную на расстоянии  $Y_3$  от точки препятствия,

наиболее удаленной от оси  $AX$  (рис. 1), с поперечной составляющей вектора скорости, равной нулю ( $v_{yM} = 0$ ), таким образом, чтобы минимизировался функционал:

$$I = \int_0^{\infty} Y_M dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

Можно показать, что минимизация функционала (3) в рамках модели (1, 2) требует создания системы с максимальным быстродействием. Тогда согласно принципу максимума Понтрягина и теореме о  $n$ -интервалах [2] оптимальное управление будет релейным и принимает только значения  $(n_{y\max}, 0, -n_{y\max})$ .

Для решения задачи будем использовать методику, описанную в [2], согласно которой алгоритм выбора оптимального управления синтезируется, исходя из анализа положения изображающей точки относительно фазового портрета оптимального переходного процесса.

Введем новые переменные:

$$x_i = X_{Pi} - X_M; y_i = Y_{Pi} + Y_s \text{sign}(Y_{Pi}) - Y_M; v_y = -V_{yM}, \quad (4)$$

где  $X_{Pi}, Y_{Pi}$  – координаты  $i$ -й точки препятствия местности в неподвижной системе координат  $AXY$ .

Тогда система уравнений (1) примет вид

$$dy_i/dt = v_y; dv_y/dt = -gn_y; dx_i/dt = -V_{xM} = \text{const}. \quad (5)$$

После введения новых переменных задача формально сводится к синтезу оптимального в смысле функционала (3) алгоритма выбора управления  $n_y = (n_{y\max}, 0, -n_{y\max})$ , перемещения изображающей точки из произвольного положения в фазовом пространстве  $Ox_yv_y$  в начало координат – точку  $O$ .

Фазовый портрет системы на завершающем этапе такого переходного процесса приведен на рис. 4 (последние три интервала постоянных значений управления). Несложно видеть, что в начало координат можно попасть по двум траекториям –  $AO$  с управлением  $n_y = -n_{y\max}$  и  $BO$  – с управлением  $n_y = n_{y\max}$ . На координату  $v_y$  согласно обозначениям (4) также наложены ограничения:

$$-v_{y\max} \leq v_y \leq v_{y\max}, \quad (6)$$

где  $|v_{y\max}| = |V_{y\max}|$ , поэтому в точке  $A$  с координатами  $(x_a, y_a, v_y = -v_{y\max})$  траектория  $AO$  переходит в траекторию  $AC$ , у которой  $n_y = 0$ , а  $v_y = -v_{y\max} = \text{const}$ . Аналогично траектория  $BO$  в точке  $B$  с координатами  $(x_b, y_b, v_y = v_{y\max})$  переходит в траекторию  $BD$ , у которой  $n_y = 0$ , а  $v_y = v_{y\max} = \text{const}$ .

Приблизиться к траектории  $AO$  изображающая точка может только по поверхности  $\Pi_1$  с управлением  $n_y = n_{y\max}$ , а к ее продолжению – траектории  $AC$  – по поверхности  $\Pi_2$  также с управлением  $n_y = n_{y\max}$ . Границей между поверхностями  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  является траектория  $AM$ .

Приблизиться к траектории  $BO$  изображающая точка может только по поверхности  $\Pi_3$  с управлением  $n_y = -n_{y\max}$ , а к ее продолжению – траектории  $BD$  – по поверхности  $\Pi_4$  также с управлением  $n_y = -n_{y\max}$ . Границей между поверхностями  $\Pi_3$  и  $\Pi_4$  является траектория  $BN$ .

Для определения уравнений вышеперечисленных траекторий и поверхностей исключим из уравнений (5) время и проинтегрируем их в обратном направлении – от конца фазовых траекторий к началу при соответствующих постоянных значениях управления  $(n_{y\max}, 0, -n_{y\max})$ .

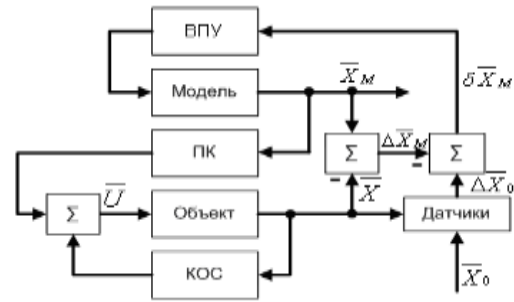


Рис. 2. Исходная структура САУ

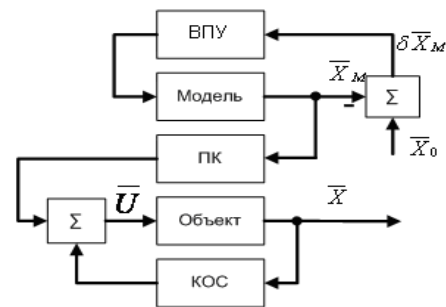


Рис. 3. Эквивалентная структура САУ

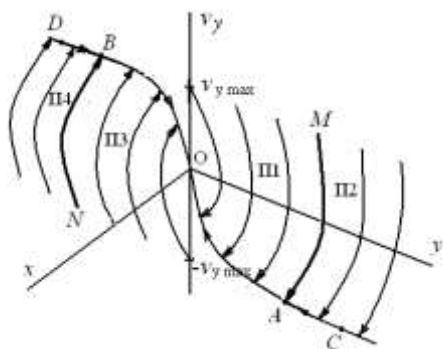


Рис. 4. Фазовый портрет системы

Получим уравнения:

– траектории  $OA$ :

$$y_{iOA} = y_i = v_y^2 / (2gn_{y\max}); \quad (7)$$

– поверхности П1:

$$y_{iП1} = y_i = -v_y^2 / 2gn_{y\max} + (-x_i gn_{y\max} + V_{xM} v_y)^2 / 4V_{xM}^2 gn_{y\max}; \quad (8)$$

– граничной траектории  $AM$ :

$$y_{iAM} = y_i = (-v_y^2 / 2 + V_{y\max}^2) / (gn_{y\max}); \quad (9)$$

– поверхности П2:

$$y_{iП2} = y_i = -v_y^2 / 2gn_{y\max} + V_{y\max} / V_{xM} (x_i - V_{xM} v_y / gn_{y\max} - V_{xM} V_{y\max} / gn_{y\max}); \quad (10)$$

– траектории  $BO$ :

$$V_{xM} V_{y\max}; \quad (11)$$

– поверхности П3:

$$y_{iП3} = y_i = v_y^2 / 2gn_{y\max} - (x_i gn_{y\max} + V_{xM} v_y)^2 / 4V_{xM}^2 gn_{y\max}; \quad (12)$$

– граничной траектории  $BN$ :

$$y_{iBN} = y_i = (v_y^2 / 2 - V_{y\max}^2) / (gn_{y\max}); \quad (13)$$

– поверхности П4:

$$y_{iП4} = y_i = v_y^2 / 2gn_{y\max} - V_{y\max} / V_{xM} (x_i + V_{xM} v_y / gn_{y\max} - V_{xM} V_{y\max} / gn_{y\max}). \quad (14)$$

Программная траектория будет оптимальна в смысле функционала (3), если она совпадает с прямой  $AB$ , за исключением необходимых отклонений по объезду препятствий. Алгоритм должен анализировать все точки препятствия для определения момента начала маневра обгибания препятствия, однако маневр должен начинаться в момент, когда потенциально опасные точки появляются как в положительной, так и в отрицательной частях плоскости  $AХУ$ , причем программная траектория должна обгибать сторону препятствия, которая меньше отклоняется от оси  $АХ$ .

Любая  $i$ -я точка препятствия при  $Y_{Pi} > 0$  является потенциально опасной для объекта, если изображающая точка попала на поверхности П1, П2, траекторию  $OA$  или пересекла их. Соответственно при  $Y_{Pi} < 0$  признаком потенциальной опасности  $i$ -й точки препятствия является попадание изображающей точки на поверхности П3, П4, траекторию  $OB$  или их пересечение.

При попадании изображающей точки на одну из поверхностей или линий переключения, приводящих ее в начало координат (в соответствии со знаком  $Y_{Pi}$ ), программное управление должно выбираться равным управлением, для которого получены эта поверхность или линия. Если изображающая точка не попала ни на одну из линий или поверхностей переключения, программное управление должно выбираться таким, чтобы оно переводило модель к траектории  $AB$  за минимальное время.

В соответствии с изложенным подходом сформирован алгоритм выбора управления на каждом шаге интегрирования уравнений (1), однако для стабилизации объекта на прямой  $AB$  использован регулятор с зоной линейности при малых отклонениях.

1. Выбор программного управления, стабилизирующего объект на траектории  $AB$ , осуществляется регулятором с законом управления, учитывающим ограничения (2):

$$H1 = c_1(Y_M - (Y_{Pi} + Y_3 \text{sign}(Y_{Pi}))) + c_2 V_{yM}; \quad (15)$$

$$H2 = \begin{cases} H1, & \text{если } |H1| < n_{y\max}; \\ n_{y\max} \text{sign}(H1), & \text{если } |H1| \geq n_{y\max}; \end{cases} \quad (16)$$

$$n_{yp} = \begin{cases} H2, & \text{если } (|V_{yM}| < V_{y\max}) \vee (H2 > 0 \wedge V_{yM} < V_{y\max}) \vee (H2 < 0 \wedge V_{yM} > -V_{y\max}); \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (17)$$

где  $c_1, c_2$  – постоянные коэффициенты;  $H_1, H_2$  – промежуточные переменные;  $n_{yp}$  – выходной сигнал регулятора;  $Y_{\Pi}$  – координата препятствия в системе координат  $AXY$  в месте нахождения объекта.

2. Для каждого положения луча дальномера выбирается программное управление:

Если  $Y_{\Pi} \geq 0$ , то:

$$H_{3i} = \begin{cases} y_{\Pi 1}, & \text{если } y_i - y_{iAM} < 0; \\ y_{\Pi 2}, & \text{если } y_i - y_{iAM} \geq 0. \end{cases} \quad (18)$$

$$n_{y1i} = \begin{cases} n_{y_{\max}}, & \text{если } [(y_i - H_{3i} \geq 0) \wedge (V_{yM} < 0)] \vee [(y_i - H_{3i} \geq 0) \wedge (V_{yM} \geq 0) \wedge (y_i - y_{iOA} > 0) \wedge (V_{yM} < V_{y_{\max}})]; \\ 0, & \text{если } [(y_i - H_{3i} < 0) \wedge (V_{yM} \leq -V_{y_{\max}})] \vee [(y_i - H_{3i} \geq 0) \wedge (V_{yM} \geq 0) \wedge (y_i - y_{iOA} > 0) \wedge (V_{yM} \geq V_{y_{\max}})]; \\ -n_{y_{\max}}, & \text{если } [(y_i - H_{3i} < 0) \wedge (V_{yM} > -V_{y_{\max}})] \vee [(y_i - H_{3i} \geq 0) \wedge (V_{yM} \geq 0) \wedge (y_i - y_{iOA} \leq 0)]. \end{cases} \quad (19)$$

Если  $Y_{\Pi} < 0$ , то:

$$H_{4i} = \begin{cases} y_{\Pi 3}, & \text{если } y_i - y_{iBN} \geq 0; \\ y_{\Pi 4}, & \text{если } y_i - y_{iBN} < 0. \end{cases} \quad (20)$$

$$n_{y2i} = \begin{cases} -n_{y_{\max}}, & \text{если } [(y_i - H_{4i} \leq 0) \wedge (V_{yM} > 0)] \vee [(y_i - H_{4i} \leq 0) \wedge (V_{yM} \leq 0) \wedge (y_i - y_{iOB} < 0) \wedge (V_{yM} > -V_{y_{\max}})]; \\ 0, & \text{если } [(y_i - H_{4i} > 0) \wedge (V_{yM} \geq V_{y_{\max}})] \vee [(y_i - H_{4i} \leq 0) \wedge (V_{yM} \leq 0) \wedge (y_i - y_{iOB} < 0) \wedge (V_{yM} \leq -V_{y_{\max}})]; \\ -n_{y_{\max}}, & \text{если } [(y_i - H_{4i} > 0) \wedge (V_{yM} < V_{y_{\max}})] \vee [(y_i - H_{4i} \leq 0) \wedge (V_{yM} \leq 0) \wedge (y_i - y_{iOB} \geq 0)]. \end{cases} \quad (21)$$

Здесь  $i = \overline{0, k}$ ;  $H_{3i}, H_{4i}$  – промежуточные переменные.

Каждому значению  $i$  соответствует упорядоченная тройка  $\{n_{y1i}, Y_{\Pi}, h_{1i}\}$ , где  $h_{1i} = (y_i - H_{3i})$ , если  $Y_{\Pi} \geq 0$ , и  $\{n_{y2i}, Y_{\Pi}, h_{2i}\}$ , где  $h_{2i} = (y_i - H_{4i})$ , если  $Y_{\Pi} < 0$ .

3. Если отсутствуют тройки, в которых  $Y_{\Pi} \geq 0$ , то формируется тройка  $\{n_{y1} = n_{y_{\max}}, Y_{\Pi} = 100, h_1 = 1\}$  и пропускаются п.п. 5, 7 алгоритма.

4. Если отсутствуют тройки, в которых  $Y_{\Pi} < 0$ , то формируется тройка  $\{n_{y2} = -n_{y_{\max}}, Y_{\Pi} = -100, h_1 = -1\}$  и пропускаются п.п. 6, 8 алгоритма.

5. Из всех троек, соответствующих  $Y_{\Pi} \geq 0$ , отбираем те, у которых  $n_{y1i} > -n_{y_{\max}}$ . Если таких пар нет, то формируем тройку  $\{n_{y1} = -n_{y_{\max}}, Y_{\Pi} = 0, h_1 = -1\}$  и пропускаем п. 7 алгоритма.

6. Из всех троек, соответствующих  $Y_{\Pi} < 0$ , отбираем те, у которых  $n_{y2i} < n_{y_{\max}}$ . Если таких пар нет, то формируем тройку  $\{n_{y2} = n_{y_{\max}}, Y_{\Pi} = 0, h_2 = 1\}$  и пропускаем п. 8 алгоритма.

7. Из оставшихся троек, соответствующих  $Y_{\Pi} \geq 0$ , отбираем ту, у которой  $Y_{\Pi}$  максимально. Обозначим параметры этой троек  $\{n_{y1}, Y_{\Pi}, h_1\}$ .

8. Из оставшихся троек, соответствующих  $Y_{\Pi} < 0$ , отбираем ту, у которой  $Y_{\Pi}$  минимально. Обозначим параметры этой группы  $\{n_{y2}, Y_{\Pi}, h_2\}$ .

9. Выбираем программное управление:

$$n_y = \begin{cases} n_{yp}, & \text{если } h_1 < 0 \vee h_2 > 0; \\ n_{y1}, & \text{если } h_1 \geq 0 \wedge |Y_{\Pi}| < |Y_{\Pi 2}|; \\ n_{y2}, & \text{если } h_2 \leq 0 \wedge |Y_{\Pi}| \geq |Y_{\Pi 2}|. \end{cases} \quad (22)$$

В результате интегрирования уравнений (1) с выбранным значением управления получаем численное значение координат модели  $Y_M, V_{yM}$ , которые и определяют значение программной траектории в каждый момент времени. Координату  $X_M$  модели принимаем равной координате  $X_p$  центра масс робота.

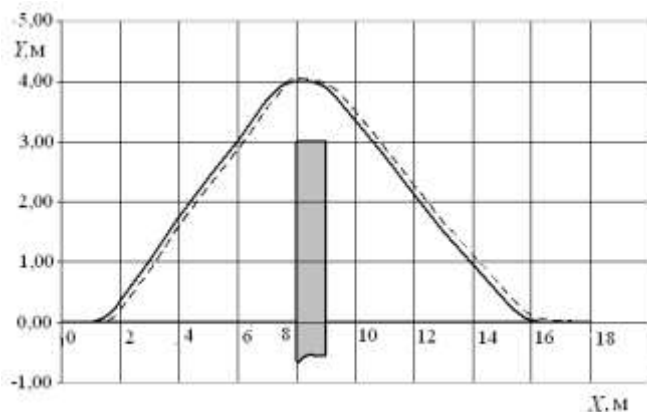


Рис. 5. Результаты моделирования объезда препятствия

жал робот. Программная траектория на этом графике показана сплошной линией, траектория движения центра масс робота – пунктирной.

Из результатов моделирования следует, что программная траектория соответствует предъявляемым требованиям. Робот правильно выбрал направление объезда препятствия, отклонение траектории движения центра масс робота от программной траектории несущественно и не превышало 0,2 м.

Предложенный подход и алгоритм формирования программной траектории позволяют эффективно управлять движением робота. Несмотря на кажущуюся сложность, алгоритм управления может быть легко реализован в бортовом компьютере мобильного робота и использоваться в качестве основной части общего алгоритма при создании системы управления. При этом предложенный алгоритм формирования программной траектории может послужить в качестве базового при создании алгоритмов, позволяющих мобильному роботу проезжать между препятствиями местности, объезжать группу препятствий, а также положен в основу гибкой системы управления движением робота.

Работа выполнена при поддержке гранта МОН РФ № 02.740.11.0482.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лисицкий Д.Л. Выбор структуры системы автоматического управления траекторным движением мобильного робота / Д.Л. Лисицкий // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. №4(43). С. 108-110.
2. Лернер А.Я. Оптимальное управление / А.Я. Лернер, Е.А. Розенман. М.: Энергия, 1970. 360 с.
3. Буданов В.М. О движении колесных роботов / В.М. Буданов, Е.А. Девянин // ПММ. 2003. Т.67. Вып. 2. С. 244-255.

#### **Большаков Александр Афанасьевич –**

доктор технических наук, декан факультета электронной техники и приборостроения, заведующий кафедрой «Системотехника», профессор кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

#### **Лисицкий Денис Леонтьевич –**

аспирант кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 06.10.10, принята к опубликованию 27.10.10*



УДК 621.313

О.Б. Соломенкова, И.М. Павленко

## ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБИНИРОВАННОГО ВЕТРОКОЛЕСА

*Рассматриваются определение параметров комбинированной ветротурбины: коэффициентов использования энергии ветра  $C_p$  и быстроходности  $Z$ , характеризующих ее эффективность.*

Комбинированная ветротурбина, коэффициент использования энергии ветра, быстроходность

O.B. Solomenkova, I.M. Pavlenko

## CHARACTERISTICS OF THE COMBINED WIND TURBINE

*The article deals with the determination parameters of wind turbines: coefficients of wind power  $C_p$  and agility  $Z$ , characterizing its efficiency.*

Combined wind turbine, wind power operating ratio, rapidity

Главными параметрами, характеризующими эффективность ветротурбины, являются коэффициенты использования энергии ветра  $C_p$  и быстроходности  $Z$ .

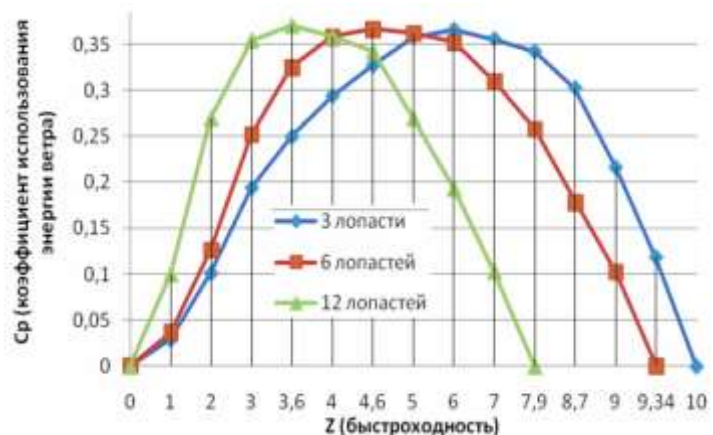
Быстроходность ветроколеса определяется отношением окружной скорости конца лопасти к скорости ветра, при этом в зависимости от диаметра и количества лопастей обороты ветроколеса при одной одинаковой скорости ветра будут разными. Для 1-лопастного ветроколеса  $Z = 9,0$ , 2-лопастного  $Z = 7,0$ , 3-лопастного  $Z = 5,0$ , 6-лопастного  $Z = 3,0$  и 12-лопастного  $Z = 1,2$  [1].

Наибольший коэффициент использования энергии ветра ветроколесо наблюдается только при определенной быстроходности, т.е. для каждой скорости ветра имеется единственное число оборотов, при котором получаем максимальный  $C_p$  [2].

Учитывая это, необходимо объединить значения максимальных коэффициентов использования энергии ветра при соответствующих коэффициентах быстроходности в единый режим работы ветроустановки. Для этого рассмотрим работу трех ветроколес с различным количеством лопастей, работающих совместно: 3-лопастное ( $Z = 5,0$ ), 6-лопастное ( $Z = 3,0$ ) и 12-лопастное ветроколеса ( $Z = 1,2$ ). Диаметр ветроколес 3 м.

Характеристика ветроколес представлена в виде зависимости коэффициентов  $C_p$  от величин  $Z$  на рисунке.

Для правой ветви характеристики  $C_p = C_p(Z)$  справедливо выра-



Графики зависимости коэффициентов использования энергии ветра  $C_p$  и быстроходности  $Z$

жение, которое аппроксимировано квадратичной параболой в пределах быстроходности  $Z_{opt} \leq Z \leq Z_{max}$ :

$$C_p = C_{pmax} - \frac{C_{pmax}}{(Z_{max} - Z_{opt})^2} (Z - Z_{opt})^2.$$

Левая ветвь аппроксимирована кубической параболой при  $Z \leq Z_{opt}$ :

$$C_p = C_{pmax} \left( \frac{Z}{Z_{opt}} \right)^2 \left[ -2 \left( \frac{Z}{Z_{opt}} \right) + 3 \right],$$

где  $C_p$  – коэффициент мощности ветроэнергетической установки (ВЭУ);  $C_{pmax}$  – максимальный коэффициент мощности ВЭУ определяется из формулы

$$C_{pmax} = (-0,109 \sigma_{нспрф}^2 + 0,18514 \sigma_{нспрф}^2 + 0,44283) 0,825$$

$\sigma_{нспрф}$  – суммарная относительная хорда профиля на периферии, т.е. на конце лопасти, для произвольного сечения лопасти:

$$\sigma_{нспрф} = \frac{2 \cdot i_L \cdot b_{нспрф}}{D},$$

$i_L$  – количество лопастей ВЭУ;  $b_{нспрф}$  – хорда сечения на конце лопасти, м;  $D$  – диаметр ветроколеса ВЭУ, м;  $Z$  – быстроходность ВЭУ;  $Z_{opt}$  – быстроходность для оптимальной мощности ВЭУ и находится по формуле

$$Z_{opt} = \frac{30,78 \sigma_{нспрф} + 18,58}{12,74 \sigma_{нспрф} + 1}.$$

$Z_{max}$  – быстроходность для максимальной мощности ВЭУ определяется из выражения

$$Z_{max} = \frac{188,93 \sigma_{нспрф} + 20,62}{28,22 \sigma_{нспрф} - 1}.$$

Таким образом, объединив характеристики быстроходного 3-лопастного, средне быстроходного 6-лопастного и тихоходного 12-лопастного ветроколеса, получили графики зависимости коэффициентов использования энергии ветра  $C_p$  и быстроходности  $Z$  для комбинированного ветроколеса. При этом каждому значению быстроходности соответствует определенное значение коэффициента использования энергии ветра, приближенное к максимальному, что увеличивает эффективность ветроколеса и позволяет ВЭУ работать в более широком диапазоне скоростей ветра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Самодельные ветроустановки: Расчет ветроколеса [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sam-stroy.info/vetryak/vetrocoleso.htm>. Дата обращения: 7.11.2010.
2. Неисчерпаемая энергия : учеб. Кн. 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. 519 с.

**Соломенкова Ольга Борисовна** – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

**Павленко Ирина Михайловна** – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 05.10.10, принята к опубликованию 20.10.10*

УДК 681.2-5

В.В. Алешкин, Ю.К. Пылаев, А.С. Матвеев

## ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ ИЗБЫТОЧНОГО БЛОКА ЧЕТЫРЕХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

*Рассмотрены алгоритмы и результаты обработки информации избыточного блока четырех волоконно-оптических гироскопов. Моделирование проведено с использованием реальных шумов датчиков. Параметры шумов и результаты моделирования представлены в числовом и графическом видах.*

БИНС, избыточность, ВОГ, шумы, алгоритмы, точность

V.V. Aleshkin, Y.K. Pylaev, A.S. Matveev

## INITIAL FOUR FIBER-OPTIC GYROSCOPES BLOCK INFORMATION PROCESSING

*The algorithms for fiber-optic gyroscopes block information processing and results of its work is presented in this article. The real noises of sensors in block were used in modeling. The properties of the noises and modeling results is presented in both number and graphic formats.*

Strapdown INS, redundancy, FOG, noises, algorithms, accuracy

### Введение

Одной из проблем в измерении угловой скорости подвижного объекта с помощью волоконно-оптических гироскопов является высокий уровень шумов в выходных сигналах ВОГ. Традиционно для борьбы с шумовыми помехами применяют осреднение сигнала во времени или частотную фильтрацию выходных сигналов ВОГ, что может привести к смещению оценок и изменению динамических характеристик измерительной системы. Кроме того, осреднение ограничивает частоту съема информации.

В работе рассматривается подход к решению задачи снижения уровня шумов применительно к избыточному блоку четырех ВОГ фирмы «Антарес» (г. Саратов) [7], который заключается в использовании алгоритмов обработки избыточной информации для борьбы со случайной составляющей ошибок.

### Блок волоконно-оптических гироскопов

Избыточный блок состоит из четырех волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), оси чувствительности (ОЧ) которых ориентированы неортогонально. У трех ВОГ оси чувствительности расположены на боковой поверхности конуса с оптимальным [1] углом полураствора конуса  $70.5^\circ$ , а ОЧ четвертого ВОГ сорие-

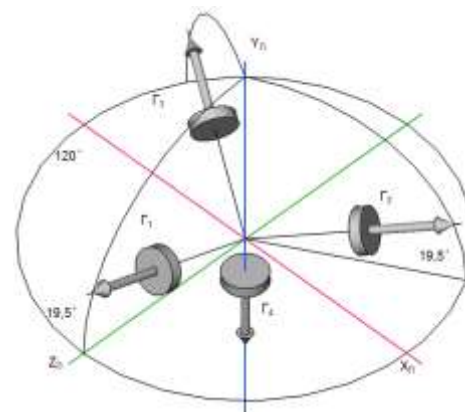


Рис. 1. Расположение и схема поворотов осей чувствительности

тирована вдоль оси конуса в отрицательном направлении. Схема расположения ОЧ в связанной с блоком системе координат  $X_{\Pi}$ ,  $Y_{\Pi}$  и  $Z_{\Pi}$  изображена на рис. 1.

Матрица направляющих косинусов осей чувствительности ВОГ в связанной системе координат и матрица связи ошибок оценивания и ориентации:

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 0.3338 & -0.9426 \\ -0.8164 & 0.3338 & 0.4713 \\ 0.8164 & 0.3338 & 0.4713 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}; N_{err} = (N^T N)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Выбор ориентации ОЧ в избыточном блоке имеет важное значение, т.к. она может привести как к уменьшению интенсивности шумов, так и к увеличению. В [1] показано, что при оптимальной ориентации ОЧ датчиков ошибки оценивания по осям  $X$  и  $Y$  уменьшаются в  $\sqrt{2}$  раз, а по оси  $Z$  в 2 раза. Матрица  $N_{err}$  имеет значения в диагонали, равные 0.75, поэтому можно ожидать уменьшения дисперсии ошибок оценивания по отношению к дисперсиям измерительных шумов на 25%.

### Характеристики шумов

Для определения характеристик шумов произведена запись сигнала одного датчика с частотой 1 кГц и его статистическая обработка. Запись производилась в вертикальном положении ОЧ датчика. В навигационной системе применено смещение нуля сигналов датчиков. В табл. 1 представлены статистические параметры шумов. Предполагается, что характеристики шумов в сигналах других датчиков аналогичны.

В табл. 2 представлена ковариационная матрица шумов.

Гистограмма и спектральная характеристика шумов представлены на рис. 2. Амплитуда шума в 2 раза больше уровня полезного сигнала. После анализа «коротких», состоящих из 10 отсчетов выборок, подтверждена значительная вариация среднего по выборке. Таким образом, можно утверждать актуальность задачи борьбы с шумами в избыточных блоках ВОГ при помощи алгоритмов обработки избыточной информации.

Таблица 1

Статистические характеристики шумов

Номер выборки	Кол-во отсчетов	Минимум, град/ч	Ср. значение, град/ч	Максимум, град/ч	СКО*, град/ч	Дисперсия, град <sup>2</sup> /ч <sup>2</sup>
1	10000	-60.6754	-20.6168	16.304	9.8116	96.2684
2	10000	-52.4947	-20.8240	19.0054	9.8516	97.0534
3	10000	-58.5871	-20.6174	13.5643	9.8931	97.8724
4	10000	-59.8324	-20.8518	12.8746	9.8683	97.3843

\* СКО – среднеквадратическое отклонение

Таблица 2

Ковариационная матрица шумов

Номер выборки	Ковариации и дисперсии, град <sup>2</sup> /ч <sup>2</sup>			
1	96.2588			
2	-0.4071	97.0437		
3	-0.2288	-1.4573	97.8627	
4	-0.242	-0.1911	-0.0302	97.3746

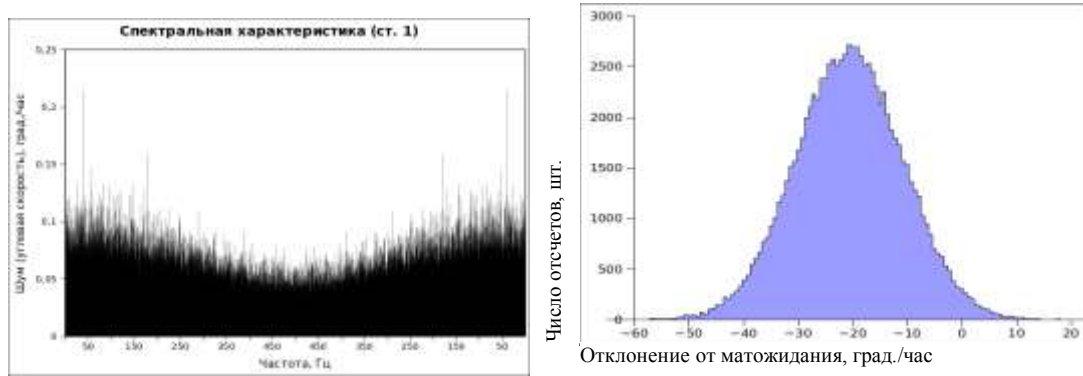


Рис. 2. Спектральная характеристика и гистограмма шумов в сигнале ВОГ

Таблица 3

Автокорреляции шумов

Номер отсчета	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 3	Выборка 4
1	1	1	1	1
2	0.248	0.263	0.250	0.246
3	-0.0066	0.0078	0.0224	-0.013
4	-0.0092	-0.0077	0.0023	-0.0222
5	0.0097	-0.007	0.0065	0.0031
6	-0.0082	0.00079	0.00413	-0.0118
7	0.0177	-0.0087	0.0097	0.0071
8	0.0021	-0.021	0.026	-0.0024
9	0.0085	-0.0125	-0.0216	0.014
10	-0.0155	0.00186	-0.00215	-0.012

Из анализа рис. 2 видно, что шумы распределены по нормальному закону и близки к «белому шуму». Поэтому можно ожидать, что алгоритмы статистической фильтрации и оценивания позволят существенно снизить уровень случайных составляющих ошибок.

В табл. 3 представлены в численном виде автокорреляции исследованных выборок.

Начиная с третьего отсчета автокорреляция выборок колеблется в окрестностях 0.01. Период квантования выборок равен 1 мс. Как видно из табл. 3, после вычитания периодической составляющей время затухания автокорреляционной функции не превышает 2 мс. Таким образом, дискретная система обработки сигналов с такими шумами должна будет иметь период квантования на входе аналогичного порядка [8].

Алгоритмы

Для первичной обработки избыточной инерциальной информации возможно применение следующих методов и алгоритмов.

Метод наименьших квадратов (МНК) и метод взвешенных наименьших квадратов (МВНК) [3]:

$$\hat{x} = [N^T N]^{-1} N^T z, \tag{2}$$

$$\hat{x} = [N^T C^{-1} N]^{-1} N^T C^{-1} z. \tag{3}$$

Метод регуляризации Тихонова:

$$\hat{x} = \tilde{x} + (\alpha E + N^T N)^{-1} N^T (z - N \tilde{x}). \tag{4}$$

В выражениях (2) – (4)  $N$  – матрица направляющих косинусов осей чувствительности датчиков;  $C$  – матрица ковариаций измерительных шумов;  $\hat{x}$  – оценка вектора входного воздействия (в данном случае угловая скорость);  $\tilde{x}$  – прогноз искомой оценки;  $z$  – вектор уровней сигналов ВОГ;  $E$  – единичная матрица.

Использование МНК не требует привлечения статистической информации об ошибках датчиков. В выражении (3) для МВНК элементы симметричной диагональной матрицы  $C$  должны быть определены по результатам статистической обработки сигналов каждого из четырех ВОГ. В табл. 2 приведены численные значения матрицы ковариаций  $C$  для четырех выборок шумов одного датчика. Можно ожидать, что для остальных датчиков ковариации будут иметь тот же порядок.

Алгоритм метода регуляризации Тихонова использует коэффициент сглаживания  $\alpha$ , для задания которого необходима информация о верхних пределах ошибок датчиков. Этот алгоритм так же нетребователен к вычислительной системе, как МНК, но при этом может настраиваться на параметры шумов и входного воздействия. В его формулу можно добавить весовую (ковариационную) матрицу.

Модифицированный алгоритм метода фильтрации Калмана (ФК) [2, 3]:

$$\begin{cases} \hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}, \\ P_k^- = AP_{k-1}A^T + D; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + C)^{-1}, \\ \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-), \\ P_k = (I - K_k H)P_k^-; \end{cases} \quad (6)$$

$$u_k = (N^T \cdot N)^{-1} \cdot N^T \cdot H \cdot \hat{x}_k \quad (7)$$

где  $\hat{x}_k^-$ ,  $\hat{x}_k$  – прогноз и уточненное значение оценки вектора состояния;  $u_k$  – искомый вектор входного воздействия;  $A$  – собственная матрица (матрица динамики);  $B$  – входная матрица (матрица управления);  $H$  – матрица измерений (составлена на основе математических моделей датчиков);  $P_k^-$ ,  $P_k$  – прогноз и уточненное значение матрицы ковариаций ошибок решения;  $D$  – ковариационная матрица шумов динамического процесса;  $K$  – матрица Калмана (коэффициенты усиления коррекции);  $I$  – единичная матрица.

Уравнение (7) является модификацией алгоритма ФК. С помощью него вычисляется значение вектора входного воздействия  $u_k$  по оценке  $\hat{x}_k$ .

Метод фильтрации Калмана-Бьюси:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + (P_{k-1}^{-1} + H^T \cdot C_k^{-1} \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot C_k^{-1} \cdot (z_k - H \cdot \hat{x}_{k-1}), \quad (8)$$

$$P_k = (P_{k-1}^{-1} + H^T \cdot C_k^{-1} \cdot H)^{-1}, \quad (9)$$

где  $H$  – матрица измерений (составлена на основе матрицы направляющих косинусов);  $\hat{x}_k$ ,  $\hat{x}_{k-1}$  – оценки вектора входного воздействия.

Метод наименьших квадратов (3) является самым простым из исследуемых. Этот метод предполагает, что шумы измерительных каналов имеют нулевое матожидание и являются «белыми». В случае варьирования амплитуд шумов в датчиках метод взвешенных наименьших квадратов (4) работает эффективнее.

Метод ФК (5) - (7), самый сложный из представленных, позволяет произвести настройку алгоритма на текущие условия работы, параметры объекта и входного воздействия. Алгоритм этого метода содержит математические модели датчиков. При использовании ВОГ в качестве моделей можно выбрать модель измерительной системы датчиков или заменить их моделями с требуемыми динамическими характеристиками, т.е. построить наблюдающее устройство Льюинбергера. Фильтр можно настраивать на основе матрицы ковариаций. Исследования показывают, что соотношение элементов матриц  $C$  и  $D$  существенно влияет на работу фильтра. При этом значения элементов матрицы  $C$  можно с достаточной



точностью определить (дисперсии и ковариации шумов в сигналах датчиков), однако внутренние шумы датчиков (помехи динамики чувствительного элемента) оценить значительно сложнее. Поэтому можно использовать матрицу  $D$  как дополнительный канал управления работой фильтра Калмана. Чтобы понять, как связаны точностные и динамические характеристики ФК и соотношение величин в матрицах  $C$  и  $D$ , можно составить скалярное уравнение вида

$$k = h \cdot p / (h^2 \cdot p + c), \quad (10)$$

качественно соответствующее первому уравнению в системе (6).

Таблица 4

Зависимость коэффициента усиления от соотношения матриц  $p$  и  $c$ 

$h = 0,2$		$c$									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$p$	0,1	0,19	0,1	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
	0,2	0,37	0,19	0,13	0,1	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04
	0,3	0,54	0,28	0,19	0,15	0,12	0,1	0,08	0,07	0,07	0,06
	0,4	0,69	0,37	0,25	0,19	0,16	0,13	0,11	0,1	0,09	0,08
	0,5	0,83	0,45	0,31	0,24	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,1
	0,6	0,97	0,54	0,37	0,28	0,23	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12
	0,7	1,09	0,61	0,43	0,33	0,27	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14
	0,8	1,21	0,69	0,48	0,37	0,3	0,25	0,22	0,19	0,17	0,16
	0,9	1,32	0,76	0,54	0,41	0,34	0,28	0,24	0,22	0,19	0,17
	1	1,43	0,83	0,59	0,45	0,37	0,31	0,27	0,24	0,21	0,19

При больших значениях  $p$  и малых  $h$  значение  $k$  будет большим. Для ФК это означает, что наибольший вклад в оценку будет давать коррекция по «невязке» (см. второе уравнение в (6)). Если  $h$  больше  $p$ , то больший вес будет у прогноза, т.е. первому уравнению в (6). Таким образом, можно, задавая нужную динамическую модель и соотношение между элементами матриц  $D$  и  $C$ , управлять полосой пропускания и эффективностью подавления шума.

Фильтр Калмана-Бьюси (8) - (9), как видно из уравнений, является средним между МВНК и ФК. Он требует меньшего количества вычислений, но не обладает такими возможностями настройки, как ФК.

В настоящее время нами ведутся исследования по выработке методик автоматической настройки алгоритмов ФК и ФКБ. Одним из возможных вариантов может стать применение генетических алгоритмов настройки [4].

Кроме перечисленных выше, для решения задачи снижения уровня случайных ошибок оценивания компонентов вектора абсолютной угловой скорости по сигналам избыточного блока ВОГ возможно применение методов модифицированного МНК, минимаксных методов фильтрации, математического аппарата вейвлет-анализа, нейросетевых алгоритмов. Все они требуют привлечения дополнительной информации о характере движений объекта или дополнительных испытаний блока ВОГ с системой первичной обработки информации.

### Программа моделирования

Для проведения исследований по программе «У.М.Н.И.К.» разработан специализированный программный продукт моделирования работы избыточного измерительного блока и алгоритмов обработки его информации. Эта программа стала дальнейшим развитием и адаптацией зарегистрированного ранее продукта [5].

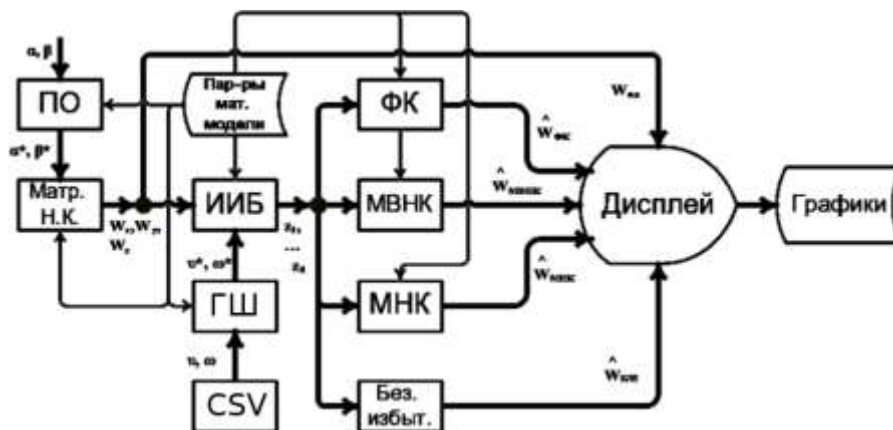


Рис. 3. Блок-схема программы моделирования

Блок ПО (подвижный объект) выдает текущие значения проекций угловой скорости объекта на связанные с объектом координатные оси. В работе используется программный эмулятор массивного подвижного объекта. Эти проекции пересчитываются через матрицу направляющих косинусов в проекции на оси чувствительности датчиков. Блок ИИБ моделирует избыточный блок. Ему на вход, помимо проекций угловых скоростей на ОЧ датчиков, подается вектор порождающих шумов. Измерительные шумы налагаются на выходные сигналы ИИБ. Вместе описанные выше блоки образуют эмуляционную часть программы. При испытаниях вектор измерения будет подаваться от блока ВОГ.

В центральной части блок-схемы изображены четыре блока оценивания (ФК, МНК, МВНК, Без избыт.), к которым планируется добавить блоки с алгоритмами модифицированного МНК, минимаксным, вейвлет-анализа и нейросетевым, фильтра Калмана-Бьюси, а также рекуррентного алгоритма регуляризации Тихонова.

### Проверка работоспособности алгоритмов

На рис. 4. представлены графики оценок компоненты Z входного вектора, полученных при пробном моделировании с помощью созданной программы фильтрации.

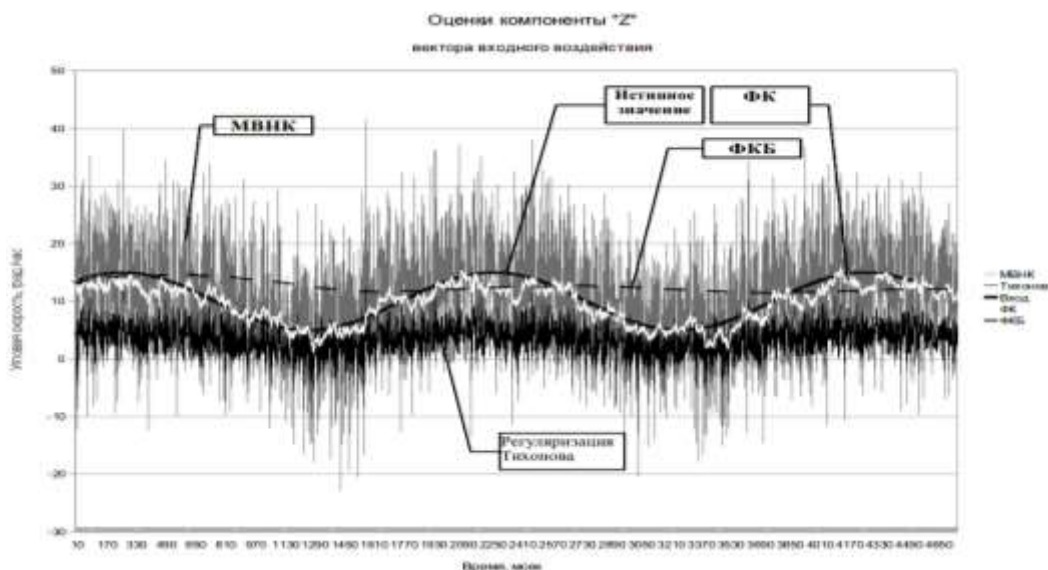


Рис. 4. Графики ошибок оценивания

Моделирование проводилось при нестационарном входном воздействии (компонента «Z» входного вектора изменялась синусоидально с амплитудой 10 град/ч и частотой 0.75 Гц). Из гра-



фигов видно, что алгоритмы ФК и МВНК дают оценки, близкие к истинному значению угловой скорости. При этом у МВНК СКО ошибок оценивания в несколько раз больше, чем у ФК. Алгоритмы ФКБ и регуляризации Тихонова требуют доработки и дополнительных исследований.

Алгоритмы, основанные на гауссовском методе наименьших квадратов, должны обеспечивать оценки, которые не коррелируются с измерительными шумами [2]. Для проверки этого факта вычислены коэффициенты корреляции между измерительными шумами реальных датчиков и оценками алгоритма МВНК. Данные сведены в табл. 5.

Таблица 5

Коэффициенты корреляции шумов и оценок МВНК

Компонента	Выборка 1	Выборка 2	Выборка 3	Выборка 4
X	0.03189	-0.0156	0.00081	-0.0252
Y	0.00663	-0.007	0.02786	0.0082
Z	0.01466	0.00267	-0.0261	-0.0018

Порядок значений коэффициентов в табл. 5 свидетельствует о слабой корреляции измерительных шумов и оценок.

Полученные предварительные результаты свидетельствуют о корректной работе программы. Численные значения погрешностей каждого из алгоритмов будут исследованы с помощью математического и полунатурного моделирования при выполнении работ по программе «У.М.Н.И.К.». За развитием проекта можно следить на его странице в сети Интернет [6].

### Заключение

Поставлена задача увеличения точности измерения абсолютной угловой скорости подвижного объекта с помощью избыточного блока ВОГ подавлением случайных составляющих помех в блоке с помощью алгоритмов первичной обработки сигналов блока. Проведены экспериментальные испытания одного из датчиков блока ВОГ. Из записанного сигнала выделены шумы, характеристики которых определены при статистической обработке.

Построены алгоритмы фильтрации, соответствующие методам наименьших квадратов и взвешенных наименьших квадратов, фильтрации Калмана и Калмана-Бьюси, регуляризации Тихонова, которые использованы при создании прототипа программы обработки информации избыточного блока четырех ВОГ.

Программа создавалась как прототип для встраивания в бортовой вычислительный модуль. Она написана на языке «Ruby», который позволяет использовать подключаемые библиотеки, написанные на языках C/C++. Пробное моделирование 5 секунд работы шести алгоритмов одновременно (5 указанных плюс оценивание без избыточности) занимает примерно 3 - 5 секунд при использовании одного из ядер процессора с частотой 1,6 ГГц. Современные мобильные вычислительные платформы (например, платформа «Atom 455», «Tegra 2», «Cortex-A9» и др.) позволяют развернуть мощную систему алгоритмической фильтрации шумов. Оптимизация алгоритмов, использование многопоточности и отказ от неэффективных алгоритмов расширят ассортимент пригодных вычислительных платформ. В настоящее время ведется апробация этого программного продукта.

Работа выполнена при поддержке гранта МОН РФ № 02.740.11.0482.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Водичева Л.В. Повышение надежности и точности бесплатформенного инерциального измерительного блока при избыточном количестве измерений / Л.В. Водичева // Гироскопия и навигация. 1997. № 1. С. 55-67.
2. Браммер К. Фильтр Калмана-Бьюси : пер. с нем. / К. Браммер, Г. Зиффлинг. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982.
3. Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений : учеб. пособие/ Сизиков В.С. СПб.: Спецлит, 1999. 240 с.
4. <https://rc.nsu.ru/text/news/Physics/102.html>
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009612269. «Программа моделирования работы избыточного измерительного блока и алгоритмов обработки его информации». 2009 г.
6. <http://metaphysics-it.net/Default.aspx?tabid=95>
7. Пылаев Ю.К. Четырехосный измеритель угловых скоростей и ускорений/ Ю.К. Пылаев и др.; патент на промышленный образец № 58620 от 16.02.06 г.
8. Свешников А.А. Вероятностные методы в прикладной теории гироскопов / А.А. Свешников, С.С. Ривкин. М.: Наука, 1974. 536 с.

### **Алешкин Валерий Викторович –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета

### **Матвеев Алексей Сергеевич –**

аспирант кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета

### **Пылаев Юрий Константинович –**

кандидат технических наук, генеральный директор НПЦ «Антарес», г. Саратов

*Статья поступила в редакцию 7.10.10, принята к опубликованию 26.10.10*

УДК 621.391

**В.В. Алешкин, П.Н. Голованов**

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ НА ТОЧНОСТЬ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ НА ГРУБЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКАХ**

*С помощью полунатурного моделирования получены оценки влияния погрешностей датчиков на точность определения параметров ориентации и навигации в комплексной инерциально-спутниковой системе на грубых датчиках, проведено сопоставление вариантов комплексирования различных информационных сигналов с датчиков.*

Ориентация, навигация, комплексная обработка информации, точность

V.V. Aleshkin, P.N. Golovanov

## EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ERRORS ON THE ACCURACY OF SENSORINTEGRATED SYSTEMS ORIENTATION AND NAVIGATION ON ROUGH INERTIAL SENSORS

*With the help of modelling estimations of influence of errors of gauges on accuracy of definition of parameters of orientation and navigation in complex inertia-satellite system on rough gauges are received, comparison of variants coupled various information signals c gauges is lead.*

Orientation, navigation, complex information processing, precision

### Введение

Для определения параметров навигации и ориентации подвижных объектов применяют бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), важным достоинством которых является возможность автономного определения параметров с произвольной частотой. Основным недостатком БИНС являются нарастающие со временем ошибки, обусловленные погрешностями гироскопов и акселерометров. Для снижения погрешностей возможен путь комплексирования информации БИНС с информацией многоантенной спутниковой системы, выдающей информацию о пространственной ориентации, координатах и скорости движения с частотой 20 Гц в условиях прямой видимости не менее четырех навигационных спутников [1].

В работе предложена структурная схема комплексной системы ориентации и навигации на грубых инерциальных датчиках и проведено полунатурное моделирование работы автономной БИНС и алгоритма комплексной обработки информации в интегрированной системе ориентации и навигации.

### Описание интегрированной системы ориентации и навигации

В состав предлагаемой комплексной системы ориентации и навигации входит инерциальный измерительный блок на основе микромеханических инерциальных датчиков (акселерометров и гироскопов) и спутниковая система ориентации. Инерциальный блок содержит избыточное количество микромеханических акселерометров и гироскопов, что позволяет повысить надежность и точность.

Структурная схема предлагаемой комплексной системы приведена ниже (рис. 1).

В качестве измерительных датчиков рассматривались микромеханические гироскопы SAR100-50 (ф. Sensorog, Англия), микромеханические акселерометры ADXL321 (ф. Analog Devices, США) и спутниковая система ориентации (ССО) на основе системы JLR-20 (ф. JRC, Япония).

Оценки проекций векторов абсолютной угловой скорости  $\hat{\omega}_x, \hat{\omega}_y, \hat{\omega}_z$  и кажущегося ускорения  $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$  на оси связанной с объектом системы координат  $X, Y, Z$  по информации избыточных блоков определялись методом наименьших квадратов (1). Для определения параметров ориентации применялись кинематические уравнения Эйлера-Крылова (2) и алгоритм работы автономной БИНС (3) [2, 3].

$$\hat{X} = (N^T \times N)^{-1} \times N^T \times Y. \quad (1)$$

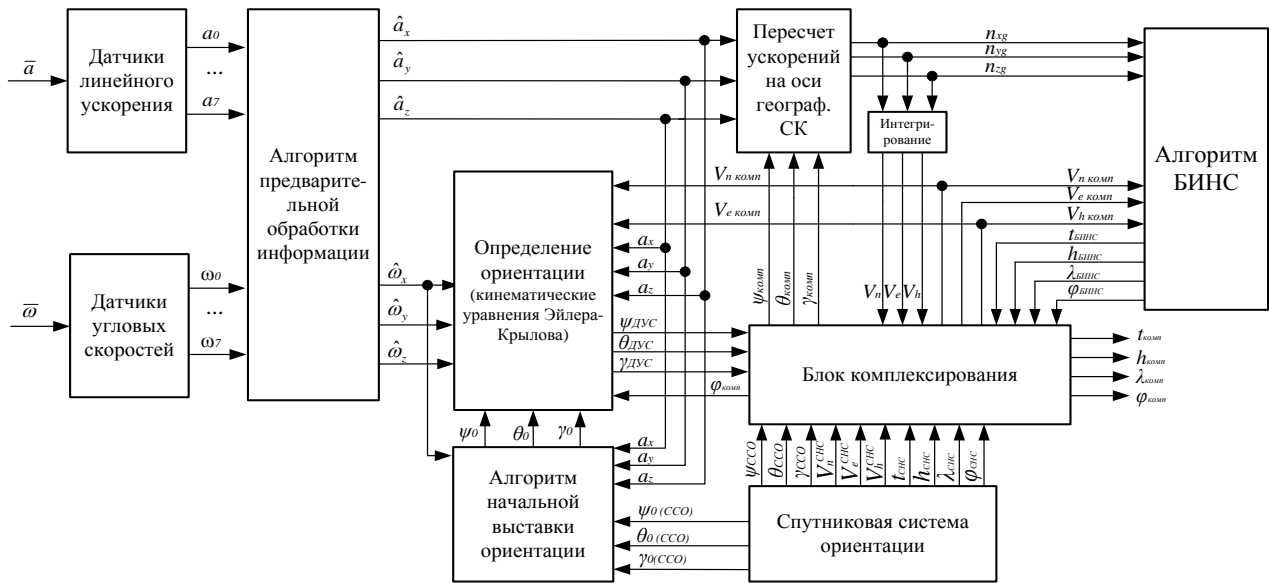


Рис. 1. Структурная схема интегрированной системы

В (1)  $N$  – матрица направляющих косинусов осей чувствительности датчиков;  $\hat{X}$  – вектор оценок проекций угловой скорости  $\hat{\omega}$  и линейных ускорений  $\hat{a}$  на связанную систему координат;  $Y$  – вектор показаний датчиков.

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= \frac{1}{\cos \vartheta} \cdot [\omega_Y^{omn} \cdot \cos \gamma - \omega_Z^{omn} \cdot \sin \gamma] \cdot \dot{\vartheta} = \omega_Y^{omn} \cdot \sin \gamma + \omega_Z^{omn} \cdot \cos \gamma, \\ \dot{\gamma} &= \omega_X^{omn} - \operatorname{tg} \vartheta \cdot (\omega_Y^{omn} \cos \gamma - \omega_Z^{omn} \cdot \sin \gamma), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\psi, \vartheta, \gamma$  – углы курса, тангажа и крена;  $\omega_X^{omn}, \omega_Y^{omn}, \omega_Z^{omn}$  – проекции угловых скоростей связанного с объектом трехгранника на оси географической системы координат.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \omega_X^{omn} \\ \omega_Y^{omn} \\ \omega_Z^{omn} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \hat{\omega}_x \\ \hat{\omega}_y \\ \hat{\omega}_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_{Xg} \\ \omega_{Yg} \\ \omega_{Zg} \end{pmatrix}^T A^{-1}, & \begin{cases} \omega_{Xg} = U \cos \varphi + \frac{V_{Zg}}{R}, \\ \omega_{Yg} = U \sin \varphi + \frac{V_{Zg}}{R} \operatorname{tg} \varphi, \\ \omega_{Zg} = -\frac{V_{Xg}}{R}, \end{cases} \end{aligned}$$

где  $\omega_{Xg}, \omega_{Yg}, \omega_{Zg}$  – проекции абсолютной угловой скорости на оси географического трехгранника;  $V_{Xg}, V_{Yg}, V_{Zg}$  – северная, вертикальная и восточная составляющие линейной скорости движения в географической системе координат;  $U$  – скорость вращения земли;  $R$  – радиус Земли;  $\varphi, \lambda, h$  – географическая широта, долгота и высота;  $A$  – матрица ориентации объекта в географической системе координат.

$$A = \begin{vmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & \sin \vartheta & -\cos \vartheta \sin \psi \\ -\cos \gamma \cos \psi \sin \vartheta + \sin \gamma \sin \psi & \cos \gamma \cos \vartheta & \cos \gamma \sin \psi \sin \vartheta + \sin \gamma \cos \psi \\ \sin \gamma \cos \psi \sin \vartheta + \cos \gamma \sin \psi & -\sin \gamma \cos \vartheta & -\sin \gamma \sin \psi \sin \vartheta + \cos \gamma \cos \psi \end{vmatrix}.$$

Уравнение автономной БИНС записываются в виде

$$\begin{cases} \varphi = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_{Xg}}{R} dt, \\ \lambda = \lambda(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_{Zg}}{R \cdot \cos \varphi} dt, \\ h = h(t_0) + \int_{t_0}^t V_{Yg} dt, \end{cases} \begin{cases} V_{Xg} = V_{Xg}(t_0) + \int_0^t (n_{Xg} - a_{Xg}^k) dt, \\ V_{Yg} = V_{Yg}(t_0) + \int_0^t (n_{Yg} - a_{Yg}^k) dt, \\ V_{Zg} = V_{Zg}(t_0) + \int_0^t (n_{Zg} - a_{Zg}^k) dt, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} n_{X_g} \\ n_{Y_g} \\ n_{Z_g} \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \hat{a}_x \\ \hat{a}_y \\ \hat{a}_z \end{pmatrix}, \quad \begin{cases} a_{X_g}^k = V_{Z_g}^2 \operatorname{tg} \phi + \frac{V_{X_g} V_{Y_g}}{R} + 2UV_{Z_g} \sin \phi, \\ a_{Y_g}^k = -\frac{V_{Z_g}^2}{R} - \frac{V_{X_g}^2}{R} - 2UV_{Z_g} \cos \phi + g, \\ a_{Z_g}^k = \frac{V_{Z_g} V_{Y_g}}{R} - \frac{V_{X_g} V_{Z_g}}{R} \operatorname{tg} \phi + 2(V_{Y_g} U \cos \phi - UV_{X_g} \sin \phi), \end{cases}$$

где  $n_{X_g}, n_{Y_g}, n_{Z_g}$  – проекции вектора кажущегося ускорения на оси географической системы координат;  $a_{X_g}^k, a_{Y_g}^k, a_{Z_g}^k$  – проекции кориолисова ускорения на оси географической системы координат.

Для комплексирования информации БИНС и СНС применялся метод компенсации (4), в соответствии с которым за истинные значения параметра (координат, скоростей и углов ориентации) принимается вектор  $Y$ , вычисленный по формулам [3]

$$\begin{cases} x_1(t) = x(t) - n_1(t), & \Delta x(t) = x_1(t) - x_2(t) = n_1(t) - n_2(t), \\ x_2(t) = x(t) - n_2(t), & y = x_1(t) - \Delta x(t), \end{cases} \quad (4)$$

где  $x_1(t), x_2(t)$  – сигналы с измерителей;  $x(t)$  – измеряемый параметр (полезный сигнал);  $n_1(t)$  и  $n_2(t)$  – погрешности измерителя.

При проведении полунатурного моделирования использовались экспериментальные записи микромеханических гироскопов и акселерометров и спутниковой системы ориентации. Съём экспериментальной информации с гироскопов и акселерометров проводился в статическом режиме, датчики были закреплены на платформе в горизонтальном положении. Испытания проводились на открытой местности, исключая погрешности затенения и переотражения радионавигационного сигнала. В табл. 1 приведены характеристики сигналов в этом положении.

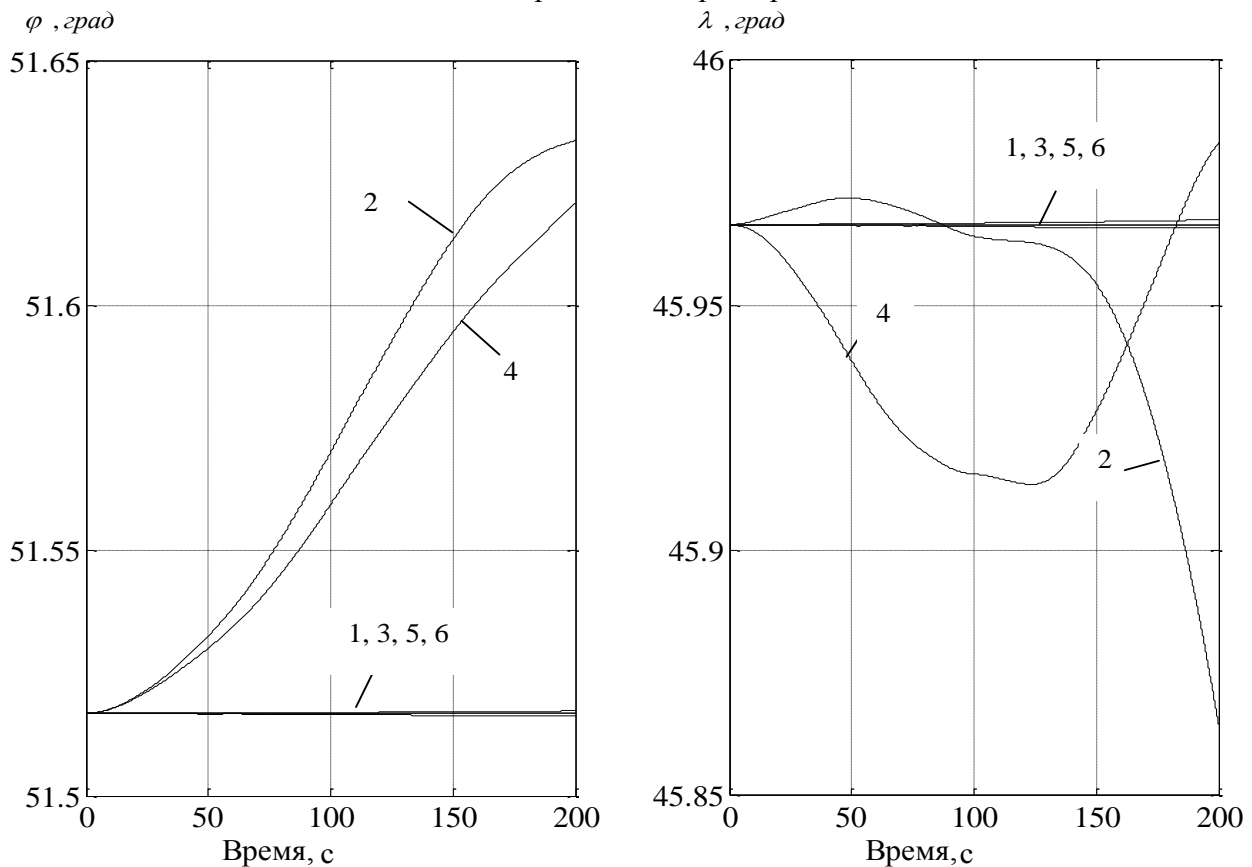


Рис. 2. График погрешности определения широты и долготы с течением времени

Основные характеристики сигналов измерителей

Параметр	СКО	Математическое ожидание	Дисперсия
<i>Информация инерциального измерительного блока</i>			
Угловая скорость, $\omega_x$	0,070889 град/с	-5.986e-014 град/с	0,005025 град <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Угловая скорость, $\omega_y$	0,072488 град/с	-4.427e-014 град/с	0,005254 град <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Угловая скорость, $\omega_z$	0,069734 град/с	-1.459e-013 град/с	0,004862 град <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Линейное ускорение, $a_x$	0,304039 м/с <sup>2</sup>	4,6108e-012 м/с	0,092439 м <sup>2</sup> /с <sup>4</sup>
Линейное ускорение, $a_y$	0,296406 м/с <sup>2</sup>	9,810000168 м/с	0,087856 м <sup>2</sup> /с <sup>4</sup>
Линейное ускорение, $a_z$	0,310932 м/с <sup>2</sup>	1,80807e-012 м/с	0,096678 м <sup>2</sup> /с <sup>4</sup>
<i>Информация спутниковой системы ориентации</i>			
Курс	0,599 град	0 град	0,000359 град <sup>2</sup>
Крен	0,536 град	0 град	0,00028 град <sup>2</sup>
Тангаж	0,6835град	0 град	0,000465 град <sup>2</sup>
Северная составляющая линейной скорости, $Vn$	0,05134 м/с	-0,002401 м/с	0,002635 м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Северная составляющая линейной скорости, $Ve$	0,09375 м/с	-0,011172 м/с	0,008789 м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Северная составляющая линейной скорости, $Vh$	0,14322 м/с	-0,040879 м/с	0,020513 м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Широта $\varphi_{СНС}$ (от СНС)	2,2391 м	51,51 град	4,054e-010 град <sup>2</sup>
Долгота $\lambda_{СНС}$ (от СНС)	2,7187 м	45,96 град	2.444e-005 град <sup>2</sup>

При проведении полунатурного моделирования рассматривались шесть случаев:

1. Моделирование работы алгоритма инерциальной навигационной системы при точных значениях измеряемых параметров движения с использованием «идеальных» сигналов (оценки  $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$  и  $\hat{\omega}_x, \hat{\omega}_y, \hat{\omega}_z$  идентичны  $\bar{a}$  и  $\bar{\omega}$ ).

2. Моделирование некорректируемой БИНС с использованием экспериментальных записей сигналов реальных датчиков.

3. Моделирование работы БИНС по п. 2 с коррекцией по информации о линейной скорости, поступающей от СНС.

4. Моделирование работы БИНС по п. 2 с коррекцией по информации о пространственной ориентации, поступающей от ССО;

5. Моделирование работы БИНС по п. 2 с коррекцией по линейному ускорению, вычисляемому по информации СНС.

6. Моделирование работы БИНС по п. 2 с коррекцией по координатам от СНС.

Моделирование проводилось в среде Simulink математического пакета Matlab.

На рис. 1 - 3 приведены графики погрешностей определения координат, линейной скорости и ориентации объекта во всех шести случаях. Среднеквадратические погрешности (СКО) сведены в табл. 2.

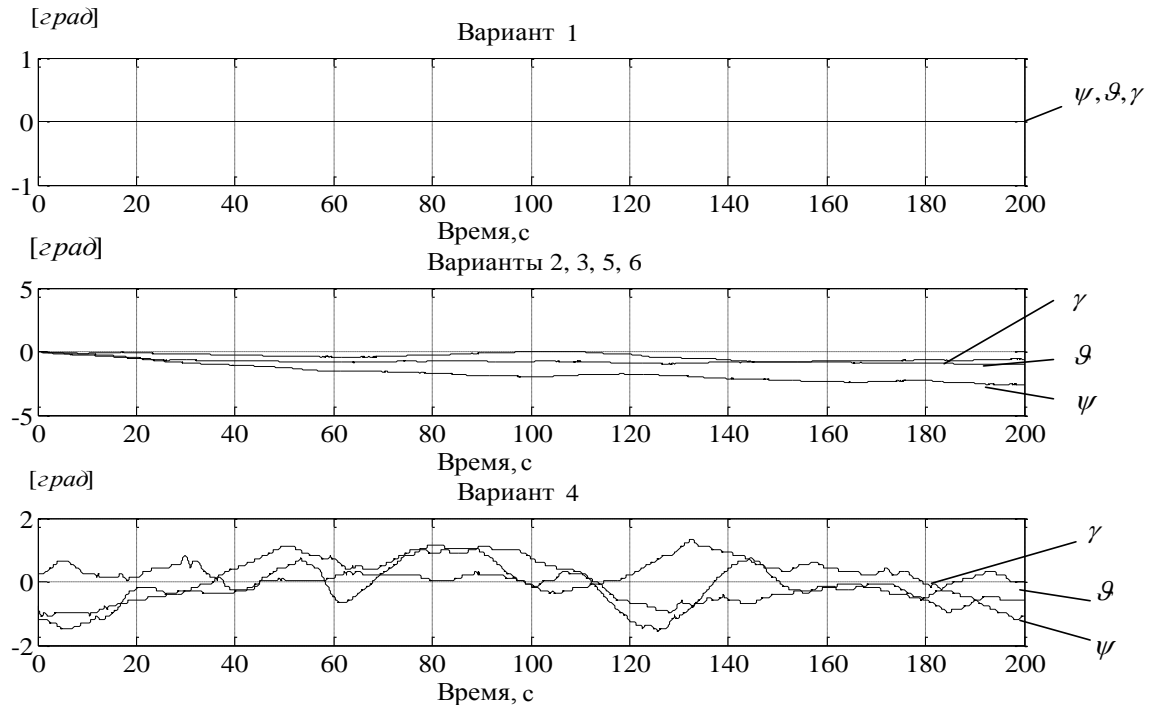


Рис. 3. График погрешности определения параметров ориентации с течением времени

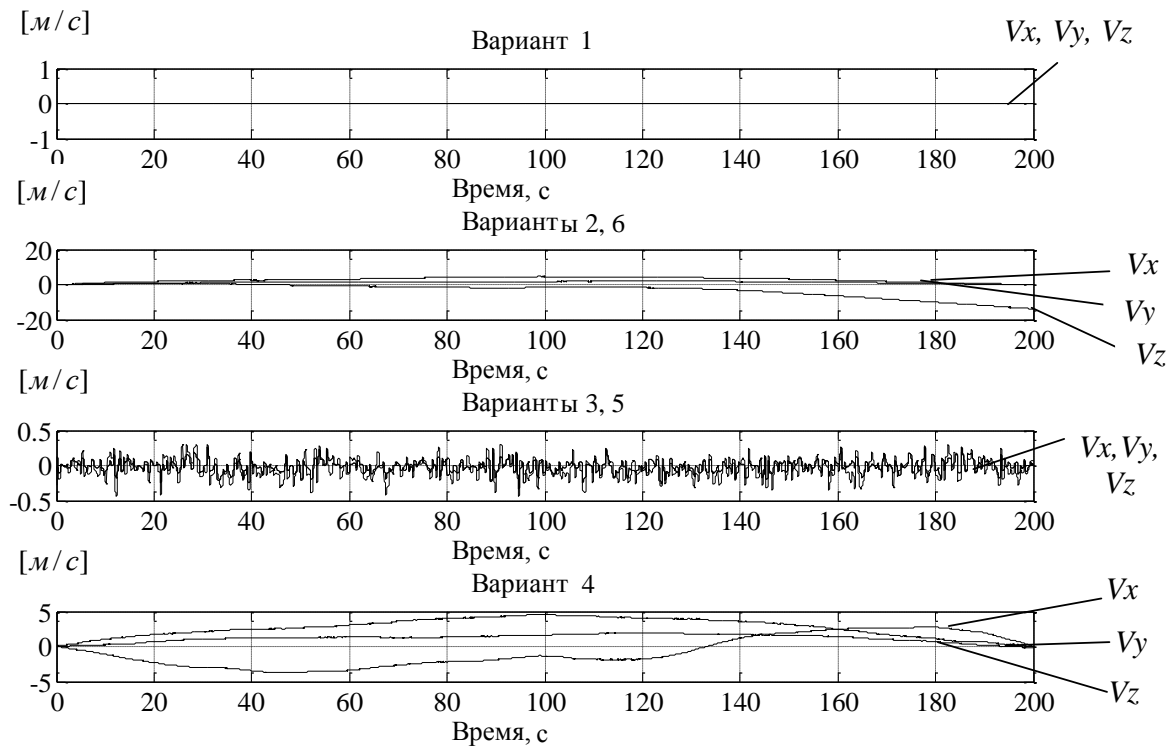


Рис. 4. График погрешности определения проекций линейной скорости на оси географической системы координат

## Результаты полунатурного моделирования

Время моделирования – 200 с, СКО								
Вариант	$\varphi$ , км	$\lambda$ , км	$V_n$ , м/с	$V_e$ , м/с	$V_h$ , м/с	$\psi$ , град	$\gamma$ , град	$\vartheta$ , град
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4,5279	2,7446	1,3019	3,878	0,5675	0,6630	0,3295	0,1853
3	0,0176	0,0282	0,0876	0,0876	0,1361			
4	3,77	2,3282	1,3033	2,1445	0,5522	0,599	0,5362	0,6835
5	0,0158	0,0327	0,0876	0,0876	0,1361	0,663	0,3522	0,1998
6	0,0022	0,0027	1,3019	3,8789	0,5675			

**Выводы**

1. Результаты моделирования по п. 1 и 2 соответствуют физическим представлениям о работе БИНС, что подтверждает правильность работы модели. Среднеквадратические ошибки автономной БИНС на грубых инерциальных датчиках за 200 с достигли при определении широты 4,52 км и долготы 2,74 км.

2. Введение коррекции от ССО привело к уменьшению погрешности определения углов курса, крена и тангажа, но не изменило нарастающего характера погрешностей определения координат из-за погрешностей акселерометров. СКО погрешности определения координат уменьшилось до 3,77 км и 2,32 км соответственно.

3. Использование информации СНС для коррекции по линейному ускорению, скорости или координатам позволяет практически устранить постоянные составляющие погрешностей определения широты и долготы. При этом СКО погрешностей при коррекции по ускорениям или скоростям составляет 0,015...0,03 км, по координатам – 0,002...0,003 км. Последние цифры соответствуют погрешностям СНС.

4. Полученные численные оценки соответствуют заданному режиму испытаний и ориентации осей чувствительности датчиков. При полунатурном моделировании работы системы на подвижном относительно Земли основании выводы будут корректироваться.

Работа выполнена при поддержке гранта МОН РФ № 02.740.11.0482.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Степанов О.А. Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем / О.А. Степанов, Д.А. Кошаев // Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации : сб. науч. тр. СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2001. С.197-222.

2. Бранец В.Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. М.: Наука, 1992. 280 с.

3. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.

**Голованов Павел Николаевич –**

аспирант кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета

**Алёшкин Валерий Викторович –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 21.10.10*



УДК 658.562.3

**М.Б. Бровкова, С.В. Свиридов, Н.С. Сидоров****КОНЦЕПЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**

*Обоснована и разработана концепция математического моделирования показателей качества функционирования технологических машин в реальном времени.*

Математическое моделирование, показатели качества, технологический процесс, реальный масштаб времени, система автоматического управления

**M.B. Brovkova, S.V. Sviridov, N.S. Sidorov****CONCEPT OF MATHEMATICAL SIMULATION OF MANUFACTURING  
EQUIPMENT PERFORMANCE**

*The article substantiates and develops the concept of mathematical simulation of manufacturing equipment performance quality index in real time.*

Mathematical modeling, quality indicators, technological process, real time scale, automatic control system

В настоящее время возникла необходимость повышения качества механообработки в соответствии с новыми требованиями реального производства при создании машин и агрегатов. В первую очередь, это относится к инновационной продукции на всем жизненном цикле ее реализации, который включает эвристический цикл формирования идеи, проведения фундаментальных и прикладных научных исследований для обеспечения дальнейшего конструирования экспериментальных и серийных образцов, их испытаний и эффективного использования при эксплуатации в реальном производстве. Практически на всех этапах жизненного цикла создания и эксплуатации инновационной продукции и технологий возникает серьезная проблема информационного обеспечения. Проблема еще более усложняется при модернизации оборудования на основе инновационных проектов и технологий. В этом случае существующие их априорные модели, часто эмпирические, и производственный опыт эксплуатации в большинстве случаев требуют корректировки. При этом также возникает необходимость создания и использования специальной информационной базы, ориентированной на регистрацию глобальных и локальных свойств рассматриваемых объектов. Эти свойства в многономенклатурном автоматизированном производстве могут быть общими с позиций машиноведения и специфическими для каждой из реализуемых технологий и технологического оборудования. Проектируемые информационные технологии и аппаратные средства должны быть универсальными. В то же время они могут быть разными как при создании научной базы, так и при эксплуатации оборудования в производственных условиях.

С учетом теоретических и технических трудностей в представленной работе обоснована и разработана концепция математического моделирования показателей качества функционирования технологических машин в реальном времени.

Исследования системных свойств технологического оборудования проведены при условии, что необходимые аналитические детерминированные и стохастические математические модели процессов, обеспечивающие и сопутствующие резанию, априорно могут быть

определены лишь концептуально в общем виде. С другой стороны, идентификация, применяемая для экспериментального определения моделей, для сложных объектов обычно сопряжена с множеством методических трудностей, в том числе и с разделением детерминированной и стохастической составляющих регистрируемых процессов и их количественной интерпретации на свойства управляемых невозмущенных и возмущенных движений системы. В нелинейных системах ее возможности еще более ограничены.

С учетом приведенных особенностей моделирования объектов рассмотрим информационную составляющую. В связи с низкой наблюдаемостью вектора выходных (управляемых и неуправляемых) параметров объект будем рассматривать в пространстве состояний  $X(t)$  (рис. 1). Целесообразность моделирования в пространстве состояний обусловлена также и тем, что наблюдение в пространстве входных и выходных координат соответствующих векторов бывает недостоверным и недоступным по ряду других причин, главными из которых являются наличие нелинейных элементов и связанность координат через объект управления. Из-за нелинейных связей принцип суперпозиции не работает и, следовательно, изменение даже одной составляющей вектора входных координат может привести к изменению всего  $m$ -мерного вектора выходных координат. К подобному эффекту приводит связанность координат через объект (рис. 3). При анализе процессов и объекта на основе интегративных оценок в пространстве состояний информационные проблемы можно значительно уменьшить за счет того, что физические процессы, обеспечивающие формообразование, будут составной частью результирующего значения критерия комплексного оценивания процессов в реальном времени. С этих позиций в работе обоснованы основные критерии качества динамических процессов при формообразовании и показана возможность производить разделение информации на отдельных уровнях иерархии наблюдения, например при диагностировании функциональных блоков. Состояние управляемых объектов (процессов) в нестационарных системах оценивается некоторым вектором  $\dot{X} = A(t)X(t) + B(t)U(t)$ , а наблюдение  $Z(t) = C(t)X(t)$ , где  $x \in R^n$  и  $u \in R^{z \times P}$ ,  $z \in R^m$ ,  $A(t)$  – матрица коэффициентов размера  $n \times n$ ,  $B(t)$  – матрица размера  $n \times r$ ,  $C(t)$  – матрица размера  $m \times n$ .

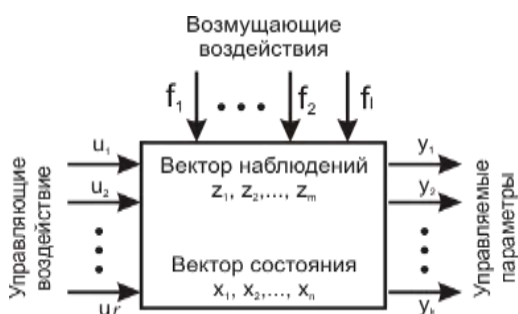


Рис. 1. Многомерный управляемый объект в пространстве состояний

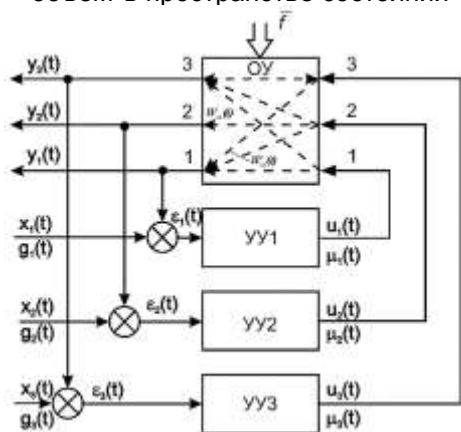


Рис. 2. Многосвязная (через многомерный объект) система автоматического управления [1]

Отмеченная ранее связанность системы через объект показана в общем виде на рис. 2 и для технологических систем (пример САУ для токарной обработки) на рис. 3. Часть подсистем могут и не иметь обратной связи.

В первом случае при всех функциональных перестройках структуры станка силы резания могут значительно изменяться, но всегда ограничены их допустимые значения даже при смене технологии. Во втором случае колебания силы резания будут квазистационарными ( $P \approx \text{const}$ ), а ее дисперсия при нормальном функционировании представляет собой небольшую величину и также ограничена. Связанность через объект можно представить, например, по следующим причинам. При изнашивании инструмента изменяется положения вектора силы резания  $P$  в 3-мерном пространстве. Это приводит к силовой деформации несущей конструкции, изменению зазоров (нелинейных элементов), температуры в зоне резания и других взаимосвязанных процессов. Изменение температуры в

зоне резания, в свою очередь, влияет на силу резания. Имеются и другие факторы, влияющие на

стационарность процесса. Универсальную комплексную динамическую модель, учитывающую все эти процессы, получить практически невозможно, т.к. для каждого нового случая она изменяется. Исследования этих процессов возможно проводить лишь в ограниченном объеме в виде имитационных экспериментов на ЭВМ.

Анализ особенностей проблемы (нелинейность, нестационарность и др.) показал, что существует необходимость применения специальных адаптивных оценок состояния системы в связи с наличием существенных возмущений, структурных и параметрических изменений объекта. Эти оценки должны быть доступными для использования в реальном времени и содержать информацию как о состоянии станка или станочного комплекса, так и о реакции на возмущения различной природы. Основой для оценок могут быть спектральные характеристики процесса резания, обработанные специальным образом, или интегральные оценки, полученные по временным моделям, например обобщенная работа при резании. За счет комплексного учета факторов состояния объекта и возмущений, отображенных в применяемых косвенных характеристиках, можно формировать оценки управляемых процессов с достоверностью, большей, чем прямые измерения параметров качества деталей, требующих дополнительных лабораторных испытаний. Оценки интегративно зависят от изменения параметров объекта и множества различных возмущений на верхнем уровне иерархических наблюдений. Подробная информация о причине изменения оценок часто и не требуется. Информация о разладке технологического процесса, полученная при динамическом моделировании на основе оценок интегративных свойств процесса, может иметь самостоятельное значение. При этом последующее диагностирование процессов для локализации неисправностей (отказов) осуществляется на следующем этапе или другом уровне иерархии.

В связи с тем, что интегративные оценки могут быть получены в реальном времени, а информация для целей диагностирования и локализация неисправностей – выделены алгоритмически, необходимо более подробно оценить возможности их получения с учетом особенностей объекта. Обычно для подобного анализа в теории автоматического управления используют временные, частотные и коэффициентные методы, для которых существуют критерии качества. В последнем случае, например, качество системы управления оценивается по коэффициентам передаточной функции без построения переходного процесса. Для получения передаточных функций необходимо преодолеть трудности, которые отмечены ранее. В нестационарных системах с нелинейными свойствами это возможно лишь с большими вычислительными затратами и только для мгновенных значений указанных оценок без интерпретации или прогнозирования состояния в других интервалах времени или при смене режимов функционирования. В противном случае возникают сложные задачи распознавания образов. Аналогичные ситуации возникают и в других случаях, например интерпретации результатов на стандартных измерительных устройствах при базировании заготовок.

Существующие неадаптивные методы анализа управляемых динамических систем основываются на априорном задании порядка  $n$  модели объекта управления. Однако и здесь имеются ограничения, так как очевидная возможность сколь угодно большого повышения порядка модели на основе учета более «тонких» физических процессов является источником неопределенности и порождает так называемую «проблему малых постоянных времени», т.е. «фазумного ограничения размерности» вектора состояния объекта. Результаты большинства исследований этой проблемы сводятся к тому, что более детальное описание объекта позволяет повысить качество управления им, но приводит к дополнительному усложнению управляющего устройства и процедуры его настройки и идентификации. Известны наблюдения другого рода, в которых отмечается значительное повышение чувствительности синтезируемой системы к вариациям ее параметров при учете более «тонких» эффектов в поведении объекта. Это дает основание считать, что учет быстропротекающих процессов с малыми постоянными времени может оказаться не только нецелесообразным по критерию сложности, но и недопустимым вследствие низкой параметрической грубости системы, приводящей к нарушениям условий ее нормальной эксплуатации. Управлять этими процессами в реальном времени практически невозможно, а чаще нецелесообразно из-за инерционности объекта.

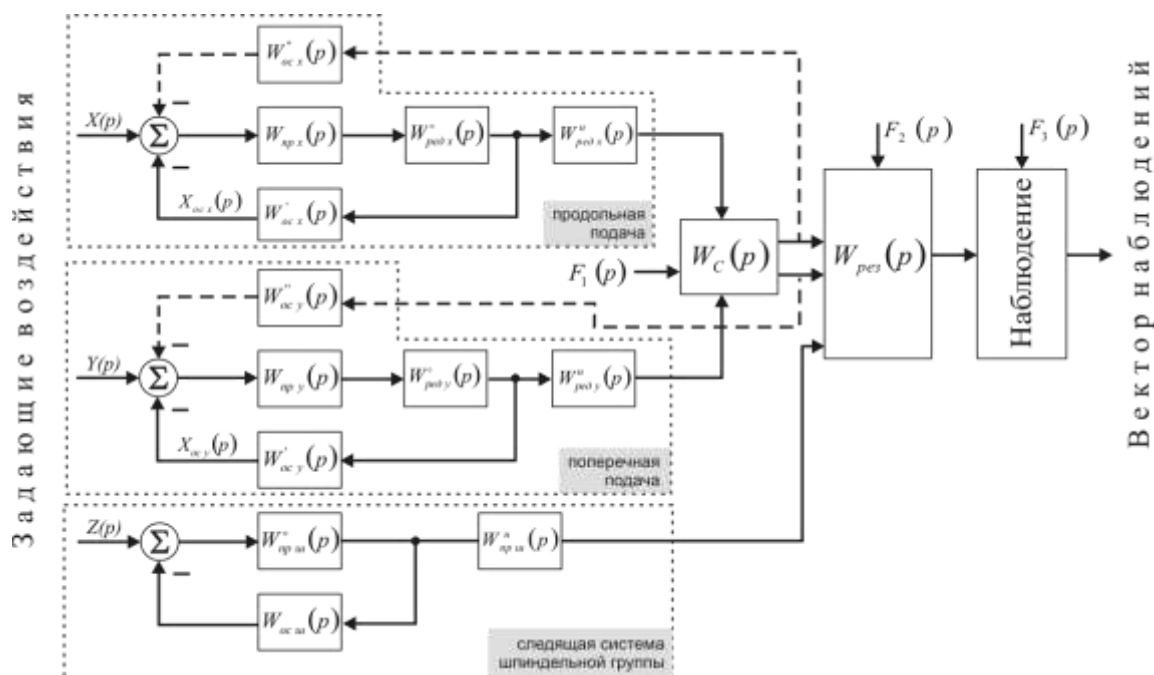


Рис. 3. Структурная схема формообразующей подсистемы САУ токарным станком

Необходимым условием нормального функционирования системы являются устойчивость неучитываемой «быстрой» части, а также «существенное» различие темпов процессов в «быстрой» и «медленной» подсистемах. Поскольку понятие «существенно» при этом количественно не определено, то возможность игнорирования в нелинейных системах «быстрых» движений нуждается в дополнительном обосновании. В нашем случае решается несколько другая задача, которая вызывает необходимость учета как «медленной», так и «быстрой» составляющих процессов, доступных для наблюдений.

Остановимся подробнее на выделении информации во временной области. Анализ нестационарной системы автоматического управления (САУ) в ряде случаев упрощается, и можно использовать методы, разработанные для стационарных систем, если САУ рассматривать как квазистационарную. В этом случае часто используют два приближенных метода: замороженных коэффициентов и замороженных реакций [1, 2].

Метод замороженных коэффициентов более прост, но менее точен. Выбирается ряд последовательных моментов времени, в которые переменные параметры принимают предельные и наиболее критические по влиянию на динамику системы значения (опасные точки). Для каждой из этих точек производится исследование САУ, причем параметры ее принимаются постоянными, т.е. «замороженными». Если качество переходных процессов в выбранных точках удовлетворяет предъявляемым требованиям, считается, что исходная система с переменными параметрами тоже будет удовлетворять этим требованиям.

Метод замороженных реакций более точен, но в обычной реализации сложнее. Как правило, его применяют для случая, когда в рассматриваемой САУ можно выделить одно звено с переменными параметрами, а остальная ее часть является стационарной. Выбирается также последовательный ряд наиболее характерных по значениям переменных параметров моментов времени  $t$ , и определяется переходная функция звена с переменными параметрами. По каждой найденной переходной функции в окрестностях опасных точек определяется эквивалентная передаточная функция, т.е. передаточная функция звена с постоянными параметрами, имеющего аналогичную переходную функцию. Следовательно, здесь САУ каждый раз заменяется эквивалентной стационарной системой, описываемой передаточной функцией с постоянными коэффициентами. Исследование необходимо провести для всех выбранных

опасных точек, как и в случае метода замороженных коэффициентов. Метод более точен, так как эквивалентное звено в определенной мере учитывает в целом переменность параметров САУ и предоставляет возможность получения прямых интегральных оценок в реальном времени по экспериментальным данным без идентификации аналитических моделей процессов.

В нашем случае апробация осуществлена для токарного модуля автоматизированного производства прецизионных деталей, в котором априорно выделить нелинейные и нестационарные элементы не представлялось возможным по вышеуказанным причинам. Регистрировался переходный процесс в момент времени врезания инструмента в заготовку. Наблюдаемые переходные процессы содержали квазидетерминированную составляющую и стохастические колебания. Детерминированная составляющая несла в этом случае информацию о «медленных» процессах, связанных с управляемыми движениями функциональных элементов станка, обеспечивающих процесс резания. Эта составляющая характеризует качества управляемых процессов без учета стохастических возмущений, приводящих к преобразованиям спектра колебаний в связи с наличием нелинейных элементов и других явлений, сопутствующих переходному процессу.

Таким образом, по результатам системного анализа сложного технологического оборудования разработана концепция математического моделирования функционирования машин, которая в отличие от существующих в производственных условиях интегративно учитывает сложное слабоформализуемое нелинейное взаимодействие детерминированных и стохастических составляющих динамических процессов, обеспечивающих и сопутствующих формообразованию. Данная технология универсальна и применима к многосвязным, нестационарным, нелинейным динамическим структурам, которые характеризуют реальные динамические системы при резании для различного технологического оборудования.

Выполнено при поддержке гранта Президента РФ МД-7455.2010.8.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: учебник для вузов / А.А. Ерофеев. СПб.: Политехника, 2002. 302 с.
2. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления : учеб. пособие / Е.П. Попов. 2-е изд., стер. М.: Наука, 1988. 256 с.

#### **Бровкова Марина Борисовна –**

доктор технических наук, профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

#### **Свиридов Сергей Викторович –**

аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

#### **Сидоров Николай Сергеевич –**

аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 08.10.10, принята к опубликованию 27.10.10*

УДК 681.518.5

**А.Ю. Мирошниченко, В.В. Сотников**

**СПЕЦИФИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В СОСТАВЕ  
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

*Предлагается способ обработки данных в режиме реального времени для систем, построенных на базе микроконтроллеров с ограниченным вычислительным ресурсом.*

Диагностика, силовые сети, информационно-измерительная система, обработка данных

**A.Y. Miroshnichenko, V.V. Sotnikov**

**THE FEATURE OF THE MICROCONTROLLERS USING IN THE DISTRIBUTED  
INFORMATION MEASUREMENT SYSTEMS**

*Proposed a real time data processing method for microcontrollers based systems with limited computational resources.*

Diagnostic, power network, information-measuring system, data processing

Основное назначение систем контроля силовой сети – это обеспечение максимальной работоспособности объекта наблюдения, учет прохождения, распределения и потребления электроэнергии, позволяющий в случае необходимости определить место и величину ее потерь и утечек. Городские распределительные силовые сети имеют сложную разветвленную структуру, их узловые точки многочисленны и удалены друг от друга. Для качественного контроля работы сети оптимально использовать распределенные информационно-измерительные системы (ИИС), позволяющие получать информацию со всех информационных точек объекта [1]. Такая система представляет собой иерархическую структуру, функционально объединяющую совокупность информационно-измерительных и вычислительных комплексов точек контроля сети (КТ), центрального информационно-вычислительного комплекса (ИВК) и аппаратуры для приемопередачи данных (рис. 1).

Согласно идеологии распределенной ИИС, составляющие общей задачи контроля сети являются разными степенями контролирующей системы. В точках непосредственного определения параметров, находящихся, как правило, на трансформаторных подстанциях (ТП), размещены модули, которые собирают и предварительно обрабатывают данные, отображающие текущее состояние участка сети. На распределительных пунктах (РП) размещаются промежуточные ИВК, основной задачей которых является оценка региональной ситуации и принятие решения о режимах связи (штатном или аварийном) с диспетчерским пунктом. Центральный ИВК системы, размещенный на диспетчерском пункте, базируется на мощном вычислительном ресурсе и обеспечивает решение задач текущего учета энергии, диагностики сети в режиме реального времени, обработки, хранения и визуализации поступающей и архивной информации.

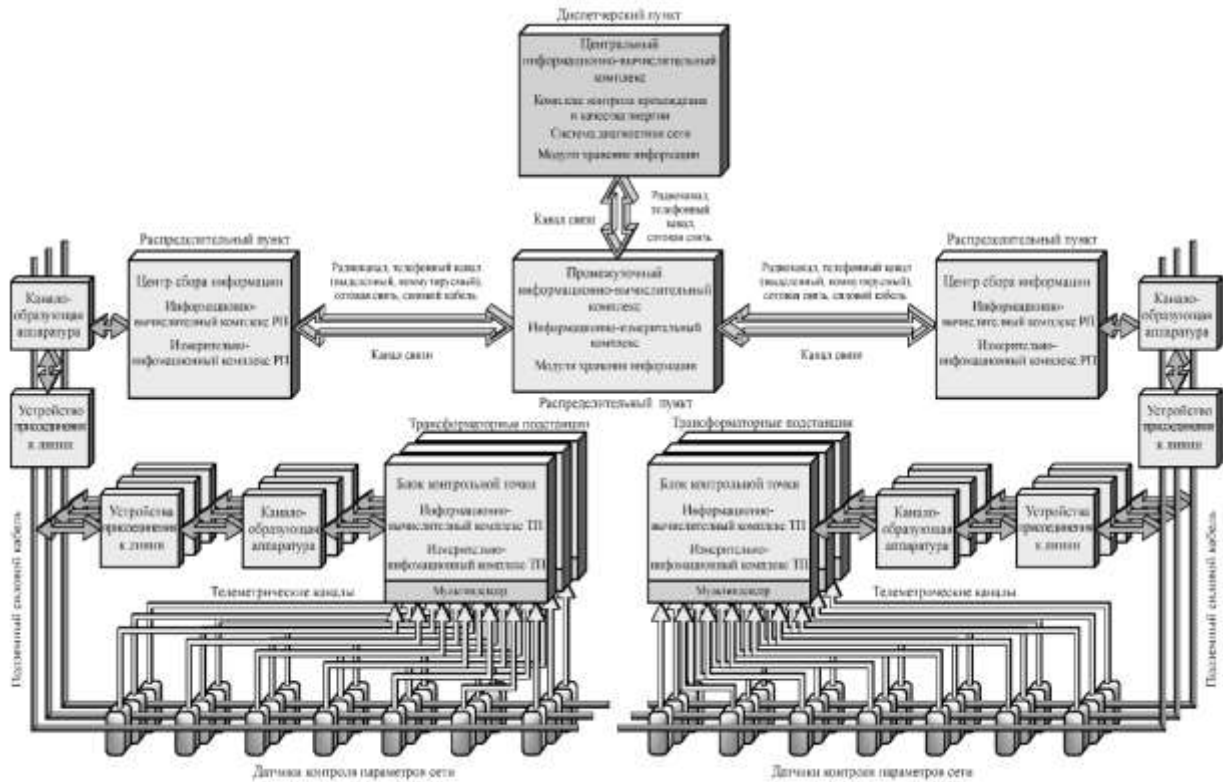


Рис. 1. Структурная схема распределенной информационно-измерительной системы

От точности и своевременности данных, поступающих из точек непосредственного контроля сети, зависит и точность работы системы. С другой стороны, в разветвленной распределительной силовой сети среднего города может содержаться до нескольких сотен (а иногда и тысяч) узловых точек. Использование такого количества дорогостоящих мощных вычислительных модулей может оказаться неоправданным с экономической точки зрения. Поэтому в составе блоков КТ системы мониторинга силовой сети «Дельта» предложено использование сравнительно простых и дешевых микроконтроллеров типа PIC-18F или ATmega128 фирмы ATMEL [2]. Однако у простых микроконтроллеров имеется ряд особенностей, отличающих их от привычных вычислительных систем. К ним, в первую очередь, необходимо отнести:

- 1) большие ресурсные затраты или отсутствие встроенных алгоритмов операций с плавающей запятой;
- 2) «затратность» или отсутствие некоторых функций (извлечение корня, тригонометрические, гармонические и т.д.);
- 3) низкая скорость многоступенной обработки данных (зависит от числа составляющих элементарных действий и количества обращений к памяти);
- 4) малые объемы долговременной и оперативной памяти;
- 5) ограниченная разрядность АЦП контроллера.

Эти особенности микроконтроллеров не позволяют использовать привычные правила обработки гармонического сигнала. Неприменима стандартная процедура определения параметров синусоиды по трем точкам, так как при этом должна использоваться отсутствующая в данном случае встроенная функция синуса. Внешнее программирование ее занимает значительный объем памяти, а вычисления требуют больших временных затрат, поэтому этот прием нежелателен при анализе сигнала «напроход», т.е. в режиме непрерывно поступающих данных. Невозможными становятся и другие известные приемы аппроксимации гармониче-

ских функций. В этих условиях перед проектировщиками возникает противоречивая задача – необходимо обеспечить скоростную обработку поступающих данных, не потеряв при этом их точности. От решения этой задачи зависит построение работоспособной системы на базе сравнительно простых и дешевых микроконтроллеров.

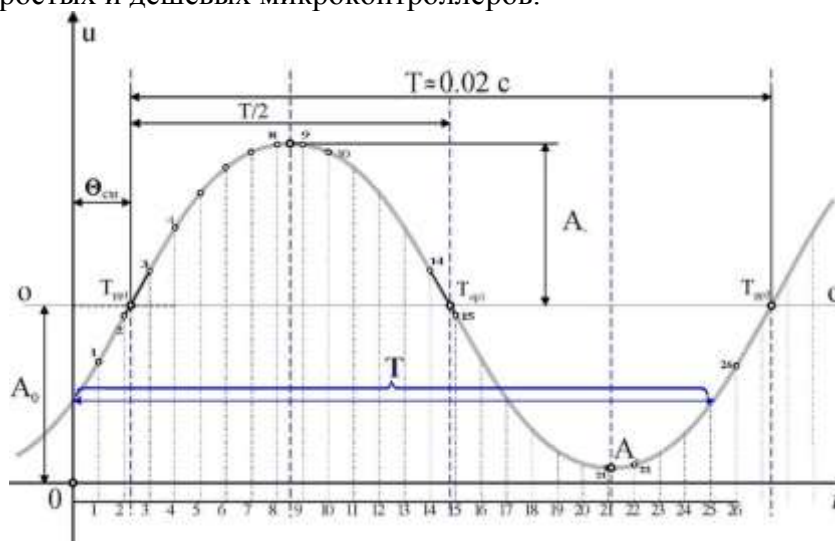


Рис. 2. Схема обработки первичных данных синусоидального процесса

Для того чтобы оценить работу конкретного участка распределительной сети, необходимо знать количество и качество поступающей и отходящей энергии, ее распределение и потребление, т.е. необходимо определить величины поступающей активной и реактивной мощностей, мощности потребления и внутренних потерь участка, а также величины напряжений и токов по каждой из трех фаз, частоты сети, косинуса угла потерь и т.д. Естественно, что обработка такого объема информации невозможна и на мощных микроконтроллерах, поэтому должен быть сформирован минимальный пакет данных, по которому в процессе обработки могут быть получены вышеуказанные величины. Очевидно, что таким пакетом являются: текущая частота сети или ее период  $T$ ; текущие значения амплитуд напряжений по трем фазам сети  $A_{U_i}$ ; текущие значения амплитуд токов по трем фазам  $A_{I_i}$ ; текущие значения фазовых углов по этим шести показателям  $\theta_k$ .

Эти величины являются характеристиками синусоидального процесса, методика их регистрации и первичной обработки не будет существенно различаться при условии, если они приведены к единому измерительному диапазону.

При выборе алгоритма обработки данных микроконтроллером предпочтение следует отдавать наиболее простым и скоростным операциям, т.е. операциям сложения, вычитания, умножения, деления, сравнения, накопления и замещения информации по определенным условиям. Так, для определения текущей амплитуды сигнала выбрана процедура последовательного замещения в памяти его мгновенных значений по условию, что поступающее значение по абсолютной величине превосходит предшествующее (рис. 2). Такая процедура проводится на интервале времени  $T_{из}$ , превосходящем период измеряемой синусоиды:

$$T_{из} > T + 2|\Delta T_{дон}|, \quad (1)$$

где  $\Delta T_{дон}$  – допустимые отклонения периода синусоиды от его среднего значения  $T$ .

Исходя из требуемой точности в определении амплитуды сигнала, выбирается необходимое число точек деления интервала измерений. Наибольшая ошибка в определении амплитуды синусоиды будет наблюдаться при условии, что два близлежащих к ее вершине



мгновенных значения равноотстоят от максимума (точки 8 и 9 рис. 2), при любом другом положении точек относительно экстремума ошибка будет существенно меньше (точки 21 и 22). Для обеспечения требуемой точности измерений шаг съема показаний  $\Delta t$  должен удовлетворять соотношению  $\cos(0.5 \cdot \Delta t / T) \leq 1 - \delta_A$ , где  $\delta_A$  – максимально допустимая ошибка в определении амплитуды. При максимально допустимой ошибке в 1.5% и среднем периоде функции  $T = 0.02$  с, получаем шаг измерений равный  $\Delta t \approx 77$  мкс, т.е. получаем 26 точек деления полного интервала измерений  $T_{из}$ . Для исполнения этой процедуры контроллер в начале процесса опроса данных запускает счетчик, который через одинаковые промежутки времени инициирует снятие очередного мгновенного значения измеряемой функции.

Для определения периода синусоиды необходимо знать интервал между двумя ее разнозначными переходами через ноль (за знак перехода договоримся принимать знак той области, в которую попадает функции после перехода). Для того, чтобы напряжение на АЦП принимало только положительные значения, на его вход обычно подают положительное смещение, заведомо большее амплитуды измеряемой функции (очевидно, что переход через среднее значение преобразуется в переход через ноль вычитанием этого смещения). Определив время положительного  $T_{pp}$  и отрицательного  $T_{op}$  переходов, период функции  $T$  можно вычислить по выражению

$$T = 2 \cdot |T_{op} - T_{pp}|, \quad (2)$$

модуль в этом выражении взят потому, что в процессе реального измерения переходы могут следовать в произвольном порядке.

Как видно из рис. 2, точки измерения могут не совпасть с действительной точкой перехода. Поэтому для определения истинного времени перехода используется линейная аппроксимация функции на отрезке между двумя обрамляющими переход точками измерений. Использование более сложной аппроксимации требует значительных временных затрат и не влечет значимого повышения точности результата. Обозначим для точек 2 и 3 (рис. 2), обрамляющих переход функции через ноль, мгновенные значения амплитуд как  $a_2$  и  $a_3$ , а время измерения как  $t_2$  и  $t_3$  соответственно, время положительного перехода  $T_{pp}$ , тогда получим из выражения

$$T_{pp} = t_3 - (a_3 / (a_2 + a_3)) \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где  $\Delta t$  – шаг снятия показаний. Время отрицательного перехода  $T_{op}$  вычисляется аналогично. Для дальнейших вычислений вместо фазы синусоиды удобнее использовать известное значение времени положительного перехода функции через ноль, выраженное в соответствующих единицах (эту величину будем называть углом смещения  $\theta$ ). Можно показать, что для идеальной синусоиды с известным периодом  $T$ , фаза функции  $\varphi$  и угол ее смещения  $\theta$  являются взаимозаменяемыми величинами и по одной из них можно однозначно определить вторую.

Опишем действия микроконтроллера в одном цикле измерений для всех 6 измеряемых синусоид [3]. В начале цикла записываются состояния счетчиков внутреннего цикла и его внешней переменной, далее обнуляются эти две величины. С начала и до конца цикла измерений инкрементируется значение переменной счетчика в диапазоне от 0 до 25000 единиц по прерыванию, вырабатываемому внутренним счетчиком. Счетчик внутреннего цикла вырабатывает прерывания один раз в 200 мкс (эту единицу назовем мигом [m],  $1 m = 200 \mu s$ ). На каждый миг приходится 2 переключения входа АЦП на следующую измеряемую величину и опрос его состояния. Одновременно с переключением входа АЦП последовательно переключаются адреса, в которые заносятся поступающие данные. Данные о мгновенных значениях измеряемых величин по операции сравнения, замещают (или не замещают) предыдущие данные, принадлежащие этой синусоиде. На кванте времени, равном 4 мигам, программа опрашивает по одной точке на всех 8 си-

нусоидах (шесть из них используются, а два значения являются резервными). По окончании одного кванта времени опрос каждой из синусоид повторяется.

При переходе опрашиваемой функции через среднее значение в память вводятся мгновенные значения амплитуд в точке, непосредственно предшествующей переходу, и в точке после перехода. Кроме них, в память заносятся показания счетчиков времени в точках после перехода. Для каждой синусоиды в пределах одного такта производится 26 опросов, функция на этом интервале, как правило, имеет два перехода через ноль. Из положительной полуволны синусоиды в память вводится максимальное значение функции, из отрицательной – минимальное. На этом первый в цикле такт заканчивается и наступает пауза, которая длится 395 мс. За это время происходят обработка поступивших данных, определение амплитуды, угла смещения и периода синусоид.

Вычисленные величины сравниваются с предельно допустимыми значениями – уставками. При выходе за допустимый предел контроллер опроса выставляет готовность экстренной передачи, формирует код аварии и продолжает работу. При условии, что измеряемая величина находится в допустимых пределах, контроллер переходит к определению следующей. По окончании вычислений контроллер переходит к следующему шагу. Такой алгоритм используется микроконтроллерами распределенной информационно-измерительной системой мониторинга «Дельта» для определения текущих параметров силовой распределительной сети в точках ее контроля.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по направлению «Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии», поддержанной грантом № П541.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурмистров А.В. Построение автоматизированной системы учёта электроэнергии и диспетчеризации в сетях 6/10 кВ и 0.4 кВ / А.В. Бурмистров // Системы АИИС КУЭ (АСКУЭ) и автоматизация расчётов с потребителями электроэнергии в энергосистемах : сб. докл. шестого науч.-техн. семинар. М., 2007. С. 81-91.
2. Большаков А.А. Математическое моделирование нештатных ситуаций в работе кабельных распределительных силовых сетей / А.А. Большаков, В.В. Сотников // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23XXIII : сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. Саратов, 2010.
3. Захаров А.А. Алгоритм распознавания типовых неисправностей силового кабеля подземных электрических сетей / А.А. Захаров, В.Д. Сорока, В.В. Сотников // Вестник СГТУ. 2009. №4(43). Вып. 2. С. 59-62.

#### **Мирошниченко Алексей Юрьевич –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

#### **Сотников Вадим Витальевич –**

аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 03.10.10, принята к опубликованию 25.10.10*

УДК 510.67

**Ю.А. Аветисян, В.С. Домнич, Д.Ю. Петров****ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ ПОДХОД  
ДЛЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО СТЕКЛА**

*В статье рассматривается проблема построения моделей для описания производства стекла флоат-способом. Предлагается использовать модели в виде причинно-следственных комплексов, чтобы обеспечить адекватное представление разнородных процессов в производственной системе.*

Причинно-следственные связи, моделирование сложных систем, флоат-процесс

**Yu.A. Avetisian, V.S. Domnich, D.Yu. Petrov****CAUSE-EFFECT METHOD TO SYSTEM ANALYSIS PLATE GLASS  
PRODUCTION PROCESS**

*In the article there problem of float-glass factories modeling is considered. Usage of models in form of cause-effect complexes is proposed to provide adequate representation of heterogeneous processes in production system.*

Cause-effect relations, complex systems modeling, float-process

Производство стекла флоат-способом представляет собой сложный комплекс различных по природе процессов. Разнородный характер реализуемых процессов затрудняет использование существующих средств математического моделирования для представления подобных производств. Следовательно, для исследования систем такого типа необходимо использовать новые модели и методы, которые позволят адекватно представлять взаимодействия различной природы. Одним из средств, ориентированных на решение данной проблемы, является теория причинно-следственных комплексов [1].

В основу теории положена формализация причинно-следственных связей, реализуемых в системе, на основе представления их звеньями специальной структуры. Звено включает группу причины, состоящую из причины и условия реализации причинно-следственной связи, и группу следствия, образованную следствием и условием, возникающим после реализации связи. Причина, следствие и условия представляются элементами некоторого универсума  $\Omega$ , содержимое которого определяется конкретной областью приложения. Ядро описывает связь активного воздействия (причины), дополненного пассивными факторами (условием 1), с результатами, согласующимися с целями системы (следствие) и представляющими побочный эффект ее функционирования (условие 2).

Для рассмотрения технологических операций и процессов при производстве флоат-стекла причина, следствие и условия каждого звена образуются пятью составляющими: командно-информационные характеристики, исполнители, оборудование, энергообеспечение, сырье и материалы.

Применение теории причинно-следственных комплексов для моделирования производства флоат-стекла имеет ряд существенных особенностей. В качестве основы для построения ПСК используются некоторые положения теории конечных детерминированных автоматов, которые являются дискретными математическими структурами. Однако производство

флоат-стекла включает значительное количество сложных значимых технологических процессов, реализация которых происходит во времени непрерывно. Чтобы обеспечить возможность применения причинно-следственных комплексов для моделирования такого производства, будем рассматривать функционирование предприятия в дискретном времени:  $t_1, t_2, \dots, t_n, \dots$  с шагом  $h$ .

Технологические процессы выработки ленты стекла и операции, образующие их, реализуются для единого объема стекломассы. Для представления таких операций дискретными звеньями причинно-следственных связей требуется условно разделить этот объем на составляющие, относящиеся к различным операциям. Рассмотрим движение стекломассы на границе технологических участков, соответствующих двум операциям.

Выделим в непрерывном объеме стекломассы фрагменты, соответствующие геометрической форме и размерам выбранных технологических участков. При переходе от одного такта к другому фрагмент стекломассы первого участка (рис. 1 а) совершит некоторое перемещение, в результате часть стекломассы перейдет на второй участок, а другая – останется на первом участке (рис. 1 б), формируя условия дальнейшей реализации соответствующей технологической операции.

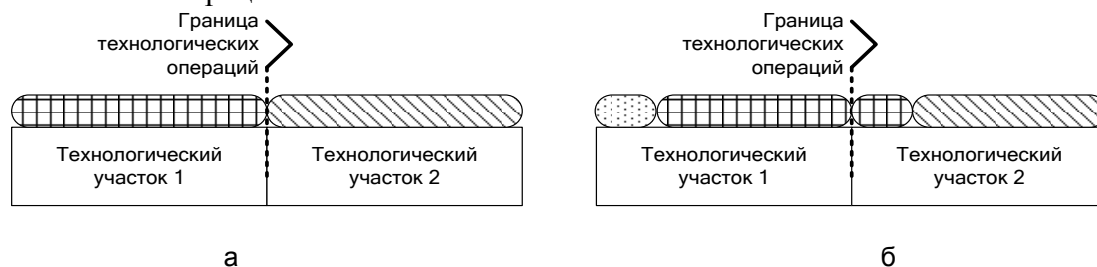


Рис. 1. Деление непрерывного участка стекломассы на дискретные фрагменты:  
а – момент времени  $t_i$ ; б – момент времени  $t_{i-1}$

Построим общую схему соединения звеньев причинно-следственных связей, моделирующих две технологические операции, из которых одна непосредственно предшествует другой в технологической карте производства флоат-стекла. В качестве причины звена выберем поступление очередного фрагмента стекломассы на соответствующий технологический участок. Условием 1 будет служить объем стекломассы, имеющейся на данном участке, а также совокупность физико-химических, технических, энергетических и иных факторов, из которых складываются технологические условия обработки стекла. Следствием звена является завершение прохождения операции некоторым фрагментом стекломассы и его выход за пределы соответствующего технологического участка. Условие 2 включает объем стекломассы, оставшийся для дальнейшей обработки на технологическом участке, а также состояние оборудования, оставшиеся запасы сырья и иные факторы, которые будут влиять на процесс в следующий момент дискретного времени.

Для каждого из звеньев требуется построить циклическую конструкцию – отождествить условие 2 с условием 1 этого звена, но на следующем такте его работы. Такой конструкции соответствует операция  $o_{20}$  алгебры звеньев причинно-следственных связей [2]. Обозначим  $H'_1 = o_{20}(H_1)$  и  $H'_2 = o_{20}(H_2)$ , где  $H_1, H_2$  – звенья, представляющие соответственно реализацию первой и второй технологической операции на одном интервале дискретного времени. Чтобы отразить в причинно-следственной модели переход материальных, энергетических и информационных ресурсов между технологическими операциями, отождествим следствие звена  $H'_1$  с причиной звена  $H'_2$ , применяя к ним операцию  $o_1$ . Полученное в результате звено  $H_3 = o_1(H'_1, H'_2)$  является составным звеном причинно-следственных связей, моделирующим рассматриваемые технологические операции с учетом связей между ними.



Рис. 2. Генеральное звено причинно-следственных связей для производства флоат-стекла

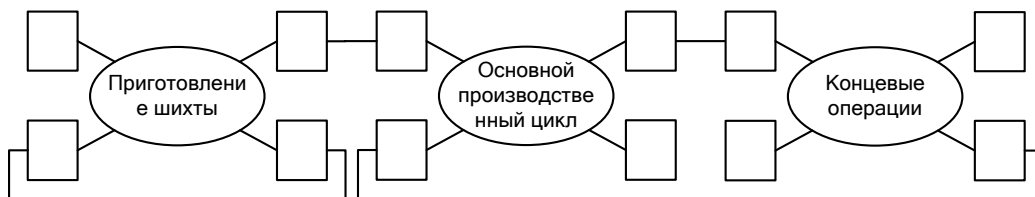


Рис. 3. Декомпозиция генерального звена

Детализация звеньев, моделирующих технологические операции, осуществляется в соответствии с особенностями протекания процессов, на которые раскладываются эти операции, и может опираться на иную схему соединения звеньев.

Построим комплекс причинно-следственных связей для производства стекла флоат-способом, выполнив детализацию технологического процесса формования до образующих его операций. На рис. 2 представлено генеральное звено причинно-следственных связей, представляющее процесс производства в целом.

Следующий уровень комплекса причинно-следственных связей содержит более детальное представление генерального звена – композицию звеньев, в которых сгруппированы основные типы технологических процессов производства.

Процессы, на которых осуществляется выработка стекла, и реализации которых следуют непосредственно друг за другом, сосредоточены в звене «Основной производственный цикл». Процессы приготовления шихты и концевых операций, имеющие другую закономерность выполнения во времени, представлены отдельными звеньями. Схема соединения звеньев на данном уровне комплекса изображена на рис. 3.

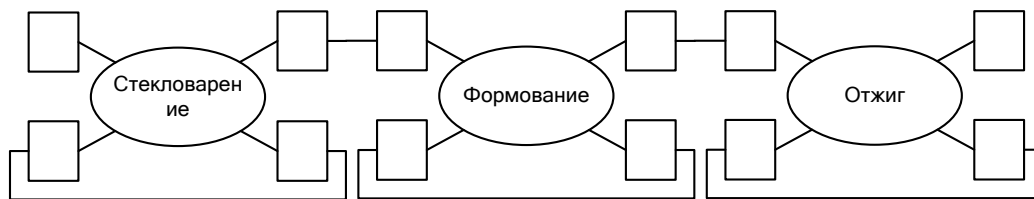


Рис. 4. Декомпозиция звена «Основной производственный цикл»

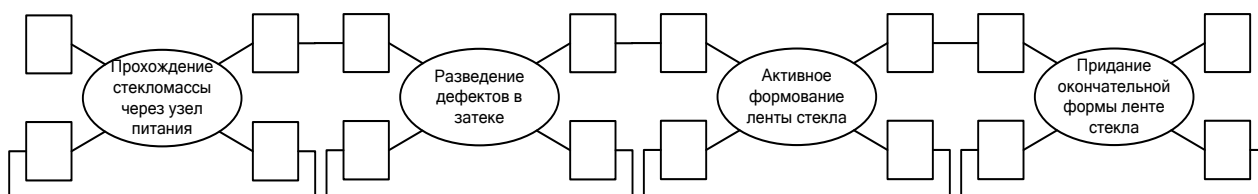


Рис. 5. Декомпозиция звена «Формование»

Звено «Основной производственный цикл» моделирует выработку полотна стекла, готового к нарезке на заданные размеры, и включает в себя технологические процессы стекловарения, формования и отжига. Декомпозиция данного звена представлена на рис. 4.

Последний этап декомпозиции рассмотрим на примере звена «Формование». Структура данного звена представлена на рис. 5.

Таким образом, в результате системного анализа производства листового стекла выполнена декомпозиция на основе причинно-следственного подхода. Данное представление информации позволяет при наличии экспертных данных о ходе технологического процесса решать задачи обучения персонала, анализа причин аварийных и предаварийных ситуаций и построить информационно-советующую систему для операторов стекольных производств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Резчиков А.Ф. Причинно-следственные комплексы как модели процессов в сложных системах / В.А. Твердохлебов, А.Ф. Резчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. М.: 2007. № 7. С.2-8.

2. Резчиков А.Ф. Причинно-следственные модели производственных систем / А.Ф. Резчиков, В.А. Твердохлебов. Саратов: Изд. центр «Наука», 2008. 138 с.

**Аветисян Юрий Арташесович** –

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем точной механики и управления РАН

**Домнич Владимир Сергеевич** –

аспирант Института проблем точной механики и управления РАН

**Петров Дмитрий Юрьевич** –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 05.10.10, принята к опубликованию 28.10.10*

УДК 666.1.013

**О.А. Крайнов, Д.Ю. Петров, П.А. Король****МОДЕЛИ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА СТЕКОЛЬНОЙ ШИХТЫ  
НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

*Разработаны методы анализа управления качеством стекольной шихты, т.е. соответствием химического состава рецепту, и качеством смешивания на основе искусственных нейронных сетей с применением программного комплекса Matlab 7.*

Производство шихты, искусственные нейронные сети

**О.А. Kraynov, D.Yu. Petrov, P.A. Korol****MODELS OF QUALITY ANALYSIS GLASS-CHARGE ON THE BASIS  
OF NEURAL NETWORKS**

*Management methods by quality glass-charge (conformity of a chemical compound to the recipe and quality of mixing) on the basis of neural networks with application of program complex Matlab 7 are developed.*

Production of glass-charge, neural networks

В условиях современной рыночной экономики при наличии свободной конкуренции для успешного развития производства листового стекла предприятию необходимо повысить качество выпускаемой продукции. Качество и потребительские свойства листового стекла зависят от однородности стекломассы, которая вместе с рядом технологических характеристик определяют применяемые сырьевые материалы, способы их обработки и подготовки шихты. Поэтому необходимо разработать комплекс моделей для анализа качества стекольной шихты.

Основными показателями качества стекольной шихты являются соответствие химического состава рецепту и заданному составу во всех микрообъемах (однородность). Незначительные отклонения от рецепта приводят к нарушениям варки и формования стекла, появлению пороков в нем. В частности, при увеличении содержания песка удлиняется протяженность зоны шихты в бассейне стекловаренной печи, при этом изменяется температурный режим печи. При увеличении содержания соды или недостаточном количестве сульфата натрия удлиняется зона пены и т.п.

Основными причинами, вызывающими отклонения в составе шихты, являются: колебания химического состава сырья и ошибки дозирования [1]. Кроме того, оказывают влияние влажность сырья и гранулометрический состав (ГС) соды. Повышение влажности сырьевого материала приводит к уменьшению основного вещества в отвесе и, следовательно, к отклонениям от рецепта. Наличие большого числа крупных фракций соды приводит к ошибкам при проведении лабораторных анализов шихты.

Соответствие шихты рецепту определяется соотношениями:

$$S1 = f_1(c1, \dots, c4, d1, \dots, d4), \quad (1)$$

где  $S1$  – отклонение от заданного химического состава по нерастворимому остатку (оксиду кремния);  $c1, c2, c3, c4$  – содержание  $\text{SiO}_2$  в песке, доломите, карбонате кальция и полево шпате, соответственно;  $d1, d2, d3, d4$  – ошибки дозаторов песка, доломита, карбоната кальция и полевого шпата, соответственно;

$$S2=f_2(c5, g1, g2, g3, h1, d5, d6), \quad (2)$$

где  $S2$  – отклонение от заданного химического состава по соде;  $c5$  – содержание  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в соде;  $g1, g2, g3$  – ГС соды, сита № 2К, № 08, № 063, соответственно;  $h1$  – влажность соды;  $d5, d6$  – ошибки дозаторов сульфата натрия и соды, соответственно;

$$S3=f_3(c6, c7, h2, h3, d2, d3), \quad (3)$$

где  $S3$  – отклонение от заданного химического состава по сумме карбонатов кальция и магния;  $c6, c7$  – содержание  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$  в карбонате кальция, соответственно;  $h2, h3$  – влажность карбоната кальция и доломита, соответственно;  $d2, d3$  – ошибки дозаторов доломита и карбоната кальция, соответственно;

$$S4=f_4(h4, d5), \quad (4)$$

где  $S4$  – отклонение от заданного химического состава по сульфату натрия;  $h4$  – влажность сульфата натрия;  $d5$  – ошибка дозатора сульфата натрия.

Качество смешивания шихты (однородность) зависит от ГС, влажности и температуры сырьевых материалов. При большом различии в зерновом составе сырьевых материалов увеличивается склонность к расслоению и комкованию готовой шихты. Шихта с нормальной влажностью не пылит, менее подвержена расслоению, так как имеет место слипание частиц. При температуре ниже  $35^\circ\text{C}$  происходит комкование шихты, так как моногидрат соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  превращается в декагидрат  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  [1, 2, 3]. Расслоение шихты и ее неоднородность вызывают неравномерное проваривание и затрудняют усреднение больших объемов стекломассы и, как следствие, приводят к появлению таких пороков как свили и шихтные камни.

Качество смешивания шихты описывается функцией

$$B=f(g4, \dots, g31, h1, \dots, h5, t1, t2, t3), \quad (5)$$

где  $g4, \dots, g8$  – ГС песка, сита № 08, № 063, № 04, № 01 и поддон, соответственно;  $g9, \dots, g13$  – ГС доломита, сита № 2, № 08, № 063, № 04, № 01 и поддон, соответственно;  $g14, \dots, g19$  – ГС полевого шпата, сита № 08, № 063, № 04, № 01 и поддон, соответственно;  $g20, \dots, g25$  – ГС соды, сита № 2К, № 08, № 063, № 04, № 01 и поддон, соответственно;  $g26, \dots, g31$  – ГС угля, сита № 08, № 063, № 04, № 01 и поддон, соответственно;  $h1, \dots, h5$  – влажность доломита, карбоната кальция, сульфата натрия, соды и угля, соответственно;  $t1, t2$  – температура песка в бункерах дозирования № 1 и № 2;  $t3$  – температура воды на увлажнение.

Построим функции (модели) (1) - (5) по выборкам входных и выходных значений и оценим их точность. Величина каждой выборки составляет 2188 значений.

Решение задачи выполнено с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) в программной среде Matlab 7 фирмы Mathworks. Выбор ИНС обусловлен тем, что между входами и выходом процессов неизвестен точный вид связей, а ИНС обладают способностью к выделению скрытых связей и обобщению. Для этой цели использованы двухмерные многослойные перцептроны (MultiLayer Perceptron, MLP-сети) и двухмерные нейронные сети, использующие радиальные базисные функции (Radial Basis Function Network, RBF-сети) [4].

В ходе многочисленных экспериментов выбрана MLP-сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки (Feed-forward backpropagation). Обучение сети проводилось по алгоритму Левенберга – Марквардта (Trainlm), который имеет эффективную реализацию в среде Matlab, хотя и требует достаточно много памяти для хранения промежуточных результатов [4]. Оценка качества обучения сети осуществлялась по соотношению

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2, \quad (6)$$

где  $N$  – величина выборки;  $e$  – разность между значениями выхода функции и выхода ИНС.

Определена первоначальная архитектура сетей для (1) - (5): количество слоев – 2, количество нейронов в первом слое равно полусумме входов и выходов сети, количество нейронов во втором слое – 1. Функция активации нейронов первого слоя сигмоидальная,



второго – линейная. Для исключения переобучения сети выборки разделены на три множества: обучающее, контрольное и тестовое.

В ходе проведенных опытов для функции (1) - (4) наиболее эффективной оказалась ИНС, содержащая 3 слоя по 50 нейронов в первом и втором слоях. Удовлетворительное значение функционала ошибки (6) достигнуто на 6-м цикле обучения и составило  $0,0004$  для обучающего множества и  $0,001$  для контрольного. Для функции (5) оптимальной оказалась ИНС, содержащая 2 слоя с 55 нейронами в первом слое. Значение функционала ошибки, равное  $9,3 \cdot 10^{-6}$  для обучающего множества и  $7,3 \cdot 10^{-4}$  – для контрольного, достигнуто на 100-м цикле обучения.

Результаты обучения ИНС для (1) - (4) и (5) иллюстрируют рис. 1, 2.

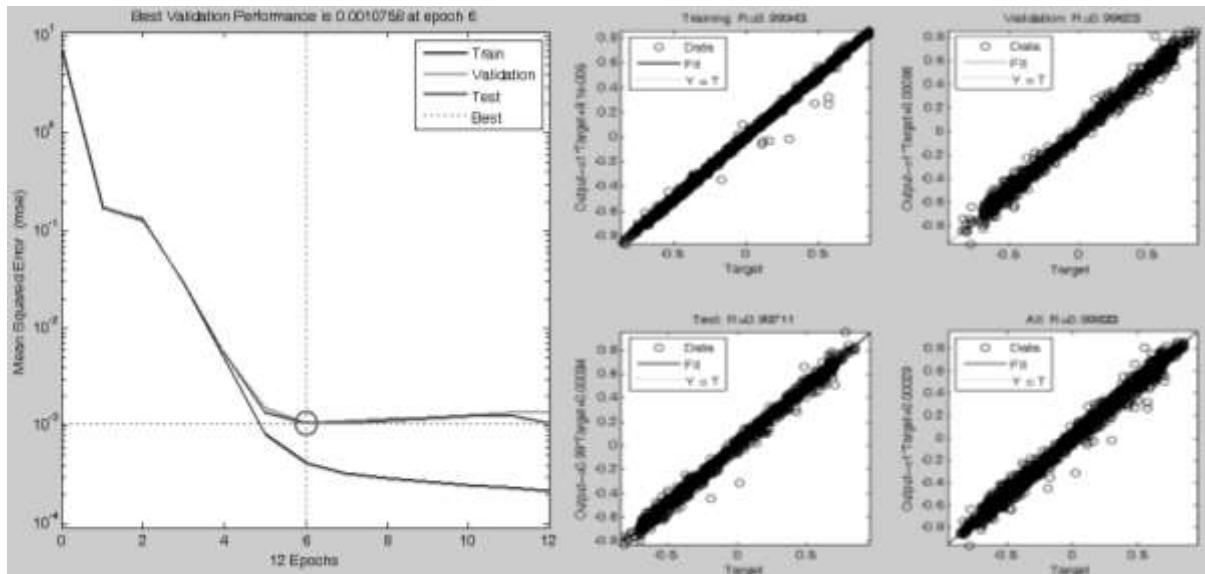


Рис.1. Результаты обучения ИНС модели соответствия шихты рецепту

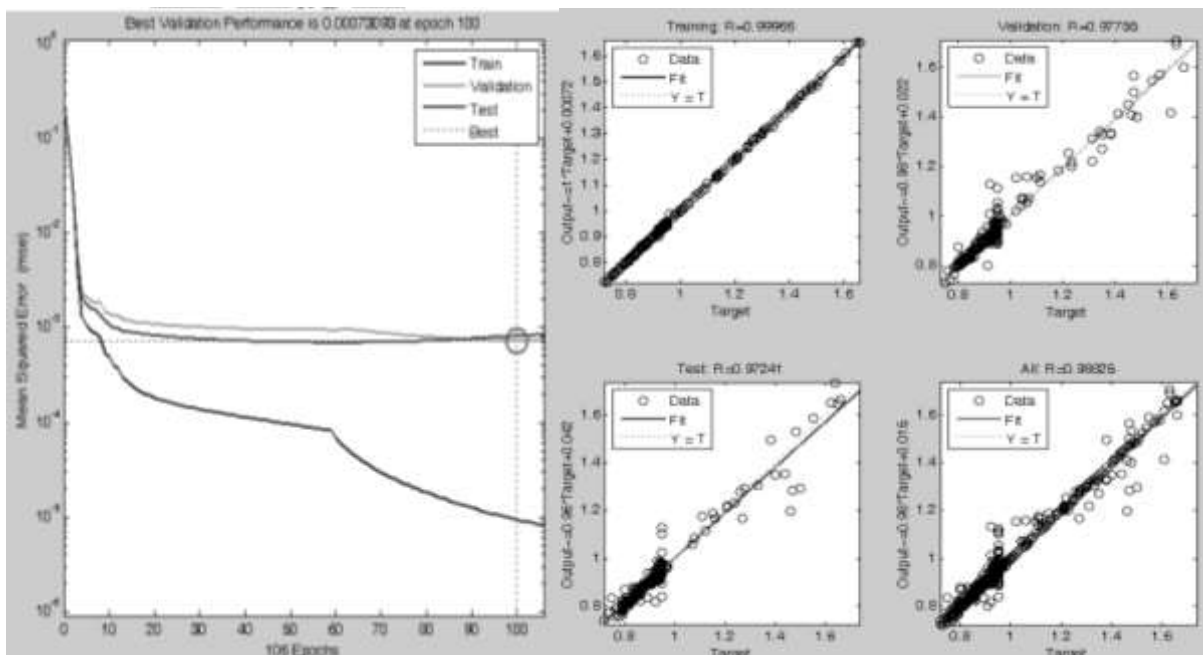


Рис. 2. Результаты обучения ИНС модели качества смешивания шихты

В левой части рис. 1 расположены графики зависимости ошибки от номера цикла обучения для обучающего, контрольного и тестового множества, а в правой части – результаты линейного регрессионного анализа для обучающего, контрольного, тестового множества и общей совокупности выборок (вид выходных значений ИНС, коэффициенты корреляции, уравнения линейной регрессии).

Таким образом, полученная структура ИНС позволяет построить функции (1) - (4) и (5) со среднеквадратичной ошибкой не более 0,001 и  $7,3 \cdot 10^{-4}$ , соответственно. Для предприятий, выпускающих листовое стекло, данная ошибка допустима, и полученные модели могут быть использованы для исследования влияния изменения свойств сырьевых материалов на качество шихты, а также для прогнозирования и управления качеством шихты. Полученная модель предназначена для прогнозирования и управления качеством стекольной шихты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Панкова Н.А., Михайленко Н.Ю. Стекольная шихта и практика ее приготовления : учеб. пособие / Н.А. Панкова, Н.Ю. Михайленко. М.: РХТУ им.Д.И. Менделеева, 1997. 121 с.
2. Производство стекла / В.В. Тарбеев, Д.Н. Шепелев, А.И. Бутняков, Т.Г. Цепелева. Н.Новгород: ФГУИПП «Нижполиграф», 2002. 234 с.
3. Маневич В.Е. Сырьевые материалы, шихта и стекловарение / В.Е. Маневич, К.Ю. Субботин, В.В. Ефременков; под ред. В.Е. Маневича. М.: РИФ «Стройматериалы», 2008. 326 с.
4. Медведев В.С. Нейронные сети. Matlab 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин; под ред. В.Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 435с.

**Крайнов Олег Александрович** –  
аспирант Института проблем точной механики и управления РАН

**Петров Дмитрий Юрьевич** –  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

**Король Павел Александрович** –  
аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 07.10.10, принята к опубликованию 21.10.10*

УДК 681.51

**В.А. Коваль, О.Ю. Торгашова, О.Е. Шворнева**

#### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НЕПРЕРЫВНОГО НАГРЕВА**

*Решена задача синтеза распределенной системы управления на основе спектрального метода представления. Закон управления построен с использованием алгоритма оптимальной дискретной фильтрации Калмана.*

Распределенная система, пространство, спектральный метод, оптимальное управление

V.A. Koval, O.Yu. Torgashova, O.E. Shvorneva

## CONTROL SYSTEM FOR THE PROCESS OF THE CONTINUOUS HEATING

*The solution of synthesis problem for the distributed system on the basis of the spectral method is found. Using the procedure of optimal discrete Kalman filtering, the control law is determined.*

Disturbed system, space, spectral method, optimal control

В настоящее время достаточно широкое распространение получили установки непрерывного нагрева металлических заготовок перед их дальнейшей обработкой. При использовании этих установок весьма важно найти такой закон управления процессом нагрева, чтобы минимизировать энергетические затраты и обеспечить требуемую точность регулирования.

Объектом управления является процесс конвективного нагрева партии заготовок, перемещающихся с постоянной скоростью  $V^*$  [м/с] вдоль оси  $x^*$  [м] по длине печи с температурой рабочего пространства  $Q_n^*(x^*, t^*)$  [°C], выступающей в роли управляющего воздействия. Температурное поле нагреваемых изделий  $Q^*(x^*, t^*)$  [°C] описывается типовым уравнением в частных производных первого порядка [1]:

$$(b^*)\partial Q^*(x^*, t^*)/\partial t^* + (b^*V^*)\partial Q^*(x^*, t^*)/\partial x^* + Q^*(x^*, t^*) = Q_n^*(x^*, t^*), \quad x^* \in (0, l), \quad t^* \in (0, \infty), \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$Q^*(x^*, t^*)|_{x^*=0} = Q^*(0, t^*), \quad \partial Q^*(x^*, t^*)/\partial x^*|_{x^*=l} = 0, \quad Q^*(x^*, t^*)|_{t^*=0} = Q^*(x^*, 0), \quad x^* \in [0, l], \quad t^* \in [0, \infty), \quad (2)$$

где  $b^*$  [с] – коэффициент, определяемый геометрическими и теплофизическими характеристиками нагреваемого материала;  $l$  [м] – длина печи;  $Q^*(x^*, 0)$  – заданная функция.

Рассмотрим задачу синтеза управления для нагревания детали до заданной температуры. Будем считать, что для измерения доступна температура  $Q^*(x^*, t^*)$  в нескольких точках вдоль оси  $x^*$  печи.

Введем обозначения  $Q = Q^*/Q_n^*$ ,  $Q_n = Q_n^*/Q_n^*$ ,  $b = b^*/b_n^*$ ,  $V = V^*/V_n^*$ ,  $\tau = t^*/t_0^*$ ,  $\xi = x^*/l$ ,  $\alpha = t_0^*/b^*$ . Выберем  $t_0^* = l/V_n^*$ ,  $Q^*(0, t^*) = Q_n^*$  и представим (1), (2) в безразмерном виде

$$\partial Q(\xi, \tau)/\partial \tau = (-V)\partial Q(\xi, \tau)/\partial \xi + \alpha[Q_n(\xi, \tau) - Q(\xi, \tau)], \quad \xi \in (0, 1), \quad \tau \in (0, \infty), \quad (3)$$

$$Q(\xi, \tau)|_{\xi=0} = Q(0, \tau) = 1, \quad \partial Q(\xi, \tau)/\partial \xi|_{\xi=1} = 0, \quad Q(\xi, \tau)|_{\tau=0} = Q(\xi, 0), \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \infty), \quad (4)$$

С учетом замены переменных  $Q(\xi, \tau) = Q(0, \tau) + Q_\Delta(\xi, \tau)$ ,  $Q_n(\xi, \tau) = Q(0, \tau) + Q_{n\Delta}(\xi, \tau)$  модель объекта (3), (4) может быть записана в отклонениях от постоянной составляющей  $Q(0, \tau)$

$$\partial Q_\Delta(\xi, \tau)/\partial \tau = (-V)\partial Q_\Delta(\xi, \tau)/\partial \xi + \alpha[Q_{n\Delta}(\xi, \tau) - Q_\Delta(\xi, \tau)], \quad \xi \in (0, 1), \quad \tau \in (0, \infty), \quad (5)$$

$$Q_\Delta(\xi, \tau)|_{\xi=0} = Q_\Delta(0, \tau) = 0, \quad \partial Q_\Delta(\xi, \tau)/\partial \xi|_{\xi=1} = 0, \quad Q_\Delta(\xi, \tau)|_{\tau=0} = Q_\Delta(\xi, 0), \quad \xi \in [0, 1], \quad \tau \in [0, \infty). \quad (6)$$

Математическая модель (5), (6) может быть преобразована к бесконечной системе обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши [2]. Представим параметры объекта управления  $Q_\Delta$ ,  $Q_{n\Delta}$ , распределенные по длине, в виде обобщенного ряда Фурье по пространственной переменной  $\xi$  на основе ортонормированной системы функций

$$P(k, \xi) = \{\sqrt{2} \sin(\pi\xi/2), \sqrt{2} \sin(3\pi\xi/2), \sqrt{2} \sin(5\pi\xi/2), \sqrt{2} \sin(7\pi\xi/2), \dots\}, \quad k = 1, 3, \infty \quad (7)$$

на интервале  $\xi \in [0, 1]$ . В этом случае форма Коши будет иметь вид

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx, \quad \theta = Dx, \quad x_0 = \text{colon} \{\phi^{Q_\Delta(\xi, 0)}, \phi^{Q_{n\Delta}(\xi, 0)}\}, \quad (8)$$

где  $x = \phi^{Q_\Delta}$ ,  $u = \phi^{Q_{n\Delta}}$  – бесконечномерные векторы состояний и управлений, компонентами которых являются пространственные моды относительной температуры нагреваемых изде-

лий  $Q_{\Delta}(\xi, \tau)$  и относительной температуры печи  $Q_{n\Delta}(\xi, \tau)$  соответственно;  $y, \theta$  – бесконечномерные векторы измеряемых и регулируемых переменных соответственно;  $x_0$  – бесконечномерный вектор начальных условий;  $A, B$  – бесконечномерные числовые матрицы, определяемые выражениями

$$A = -VP_1 - \alpha E, \quad B = \alpha E, \quad (9)$$

где  $P_1$  – бесконечномерная матрица дифференцирования первого порядка;  $E$  – бесконечномерная единичная матрица;  $C, D$  – бесконечномерные матрицы, составленные из элементов ортонормированной системы разложения, вычисленных для фиксированных значений пространственных координат из открытого интервала  $\xi \in (0, 1)$ .

Введем в рассмотрение переменную

$$\bar{y} = \eta - y, \quad (10)$$

где  $\eta$  – задающее воздействие, которое в рассматриваемой задаче является вектором, составленным из заданных значений температуры в точках измерения в начальный момент времени  $Q_{\Delta}(\xi, 0)$ ;  $\bar{y}$  – регулируемая переменная, представляющая собой рассогласование между величиной задающего воздействия и измеряемой переменной.

Уравнения (8) и (10) в совокупности представляют собой описание объекта в форме задачи слежения. Применение процедуры синтеза регулятора возможно после перехода к описанию объекта в форме задачи стабилизации:

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u + \bar{G}\bar{f}, \quad \bar{y} = \bar{C}\bar{x}, \quad \theta = \bar{D}\bar{x}, \quad (11)$$

где  $\bar{f} = \text{colon}\{\eta, \dot{\eta}\}$  – вектор эквивалентных возмущений;  $\bar{A} = SAS^{-1}$ ,  $\bar{B} = SB$ ,  $\bar{G} = [SAS^{-1}H \quad -H]$ ,  $\bar{C} = -CS^{-1} = -H^T$ ,  $\bar{D} = -DS^{-1}$ ;  $H = \text{colon}\{E, 0\}$ ,  $S = \text{colon}\{D, L\}$  – матрицы преобразования; матрица  $L$  выбирается таким образом, чтобы  $\det S \neq 0$ .

Выполним синтез дискретного регулятора для объекта (11). Будем полагать, что управление формируется с периодом квантования  $h$  с помощью ЦАП с фиксацией на период. Дискретная модель объекта будет иметь вид

$$\bar{x}(i+1) = \bar{\Phi}\bar{x}(i) + \bar{R}u(i) + \bar{M}\bar{f}(i), \quad \bar{y}(i) = \bar{C}\bar{x}(i), \quad \theta(i) = \bar{D}\bar{x}(i), \quad (12)$$

где  $\bar{\Phi} = e^{\bar{A}h}$ ,  $\bar{R} = \int_0^h e^{\bar{A}\chi} d\chi \cdot \bar{B} = \bar{A}^{-1}(\bar{\Phi} - E)\bar{B}$ ,  $\bar{M} = \int_0^h e^{\bar{A}\chi} d\chi \cdot \bar{G} = \bar{A}^{-1}(\bar{\Phi} - E)\bar{G}$ .

Также будем полагать, что пары  $(\bar{\Phi}, \bar{R})$ ,  $(\bar{\Phi}, \bar{M})$  полностью управляемы, а пара  $(\bar{C}, \bar{\Phi})$  – полностью наблюдаема.

В рассматриваемой задаче размерности векторов состояний и управлений совпадают, следовательно, для синтеза регулятора можно применить процедуру оптимальной дискретной фильтрации. Используя преобразование  $\check{x}(i) = \bar{R}^{-1}\bar{x}(i)$ , представим модель (12) в виде

$$\check{x}(i+1) = \check{\Phi}\check{x}(i) + u(i) + \check{M}\bar{f}(i), \quad \bar{y}(i) = \check{C}\check{x}(i), \quad \theta(i) = \check{D}\check{x}(i), \quad (13)$$

где  $\check{\Phi} = \bar{R}^{-1}\bar{\Phi}\bar{R}$ ,  $\check{M} = \bar{R}\bar{M}$ ,  $\check{C} = \bar{C}\bar{R}$ ,  $\check{D} = \bar{D}\bar{R}$ .

В качестве обратной связи будем использовать статический регулятор по выходу, построенный в соответствии с процедурой оптимальной дискретной фильтрации Калмана:

$$u(i) = \check{L}\check{y}(i), \quad \check{L} = -\check{\Phi}\check{P}\check{C}^T(\check{\Psi} + \check{C}\check{P}\check{C}^T)^{-1}, \quad \check{P} = \check{\Phi}\check{P}\check{\Phi}^T + \check{M}\check{\Delta}\check{M}^T - \check{\Phi}\check{P}\check{C}^T(\check{\Psi} + \check{C}\check{P}\check{C}^T)^{-1}\check{C}\check{P}\check{\Phi}^T, \quad (14)$$

где  $\check{\Delta} = \check{\Delta}^T > 0$ ,  $\check{\Psi} = \check{\Psi}^T > 0$  – некоторые весовые матрицы.

Выполним синтез регулятора (14) для объекта (1) с параметрами  $l = 0.6$  м,  $V^* = 10^{-3}$  м/с,  $V_n^* = 10^{-2}$  м/с,  $b^* = 100$  с, что соответствует  $V = 0.1$ ,  $\alpha = 0.6$  для объекта (5). Начальное состояние объекта (5):  $Q_{\Delta}(\xi, 0) = 1 - e^{-\alpha\xi}$ .

Будем полагать, что измерения производятся в двух точках  $\xi = 0.6$ ,  $\xi = 0.85$ , а период дискретности  $h = 0.1$ , что составляет 6 с. Вычислим матрицы объекта (8), (10) с учетом четырех функций системы разложения (7):

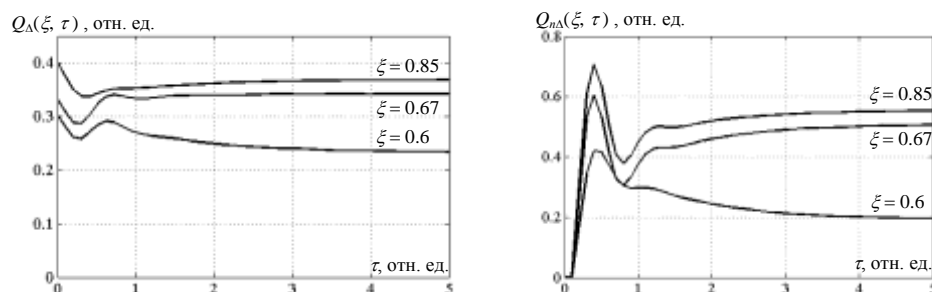
$$A = \begin{bmatrix} -0.70 & 0.30 & -0.17 & 0.23 \\ -0.10 & -0.70 & 0.50 & -0.14 \\ -0.03 & -0.30 & -0.70 & 0.70 \\ -0.03 & -0.06 & -0.50 & -0.70 \end{bmatrix}, \quad B = 0.6E_4, \quad (15)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1.14 & 0.44 & -1.41 & 0.44 \\ 1.38 & -1.08 & 0.54 & 0.11 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 1.38 & -1.08 & 0.54 & 0.11 \end{bmatrix}.$$

Матрица регулятора, вычисленная в соответствии с процедурой (14) для выбранных весовых матриц  $\tilde{\Delta} = 10^4 \cdot \text{diag}\{1.0, 0.1, 0.01, 0.001\}$ ,  $\tilde{\Psi} = 5 \cdot 10^2 \cdot \text{diag}\{1.0, 0.1\}$ , имеет вид

$$\tilde{L}^T = \begin{bmatrix} -1.84 & -0.61 & 2.39 & -0.93 \\ -3.76 & 1.38 & 0.78 & -0.86 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Анализ замкнутой системы проводился в системе Matlab средствами пакета Partial Differential Equation Toolbox. Результаты анализа представлены на рисунке.



Температура заготовки  $Q_{\Delta}$  и печи  $Q_{\text{П}\Delta}$  в точках  $\xi = 0.6$ ,  $\xi = 0.67$ ,  $\xi = 0.85$

Из рисунка видно, что точность и качество полученных переходных процессов вполне допустимы для работы системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами: учеб. пособие / Э.Я. Рапопорт. М.: Высш. шк., 2009. 667 с.
2. Коваль В.А. Спектральный метод анализа и синтеза распределенных управляемых систем / В.А. Коваль. Саратов: СГТУ, 1997. 192 с.

### **Коваль Владимир Александрович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

### **Торгашова Ольга Юрьевна** –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

### **Шворнева Ольга Евгеньевна** –

магистрант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 26.10.10*

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

---

УДК 593.3

**О.Г. Осяев, Р.А. Нейдорф**

### **МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

*На основе исходных соотношений нелинейной теории упругости и теории многослойных оболочек получена математическая модель трехмерного напряженно-деформированного состояния несущих конструкций корпусов летательных аппаратов, учитывающая изменения свойств материалов в процессе эксплуатации. Для каждого слоя рассматривается упругая постановка задачи с разложением функций всех параметров в тригонометрические ряды Фурье и конечные разности по времени в условиях идеального теплового и механического контакта слоёв. Приведен алгоритм решения задачи анализа технического состояния конструкции при изменении внешних нагрузок.*

Многослойная оболочка, несущая конструкция, математическая модель, трёхмерное уравнение движения

**O.G. Osiaev, R.A. Neydorf**

### **MODEL TO ANALYZE THE TECHNICAL CONDITION OF MULTILAYER STRUCTURE**

*Based on the original ratio of nonlinear elasticity theory and the theory of layered membranes mathematical model 3D deflected bearing structures airframe, change the properties of materials during operation. For each layer is considered tough problem statement from functions all parameters in trigonometric Fourier series and finite difference time in perfect thermal and mechanical contact layers. Algorithm solving analysis technical condition of the construction of changing external loads.*

Multi-layer shell, bearing structure, mathematical model, three-dimensional equation of motion

#### **Введение**

Для оценки технического состояния несущих конструкций, имеющих длительные сроки эксплуатации, и определения возможности их дальнейшего использования по назначению необходимо учитывать влияние вредных факторов на прочностные свойства таких конструкций. К таким факторам относятся: эксплуатационные нагрузки, техногенные катастро-

фы и аварии на технике, природные катаклизмы и состояние воздушной среды. К числу неблагоприятных относится также фактор старения материалов конструкции.

Влияние указанных факторов на состояние силовых конструкций сводится к накоплению повреждений, к изменению физико-механических, теплофизических характеристик материалов и параметров напряженно-деформированного состояния элементов конструкции.

В качестве несущих конструкций в технике все чаще используются тонкостенные оболочки сложной геометрии из металлов и композиционных материалов. При этом последние являются наиболее перспективными, т.к. отличаются высокими прочностными характеристиками при малом удельном весе. Особенности конструкций из композитов состоят в их многослойности, неоднородности и анизотропии свойств, применяемых конструкционных материалов. Эти особенности учитываются в рассматриваемой математической модели.

Эксплуатационные нагрузки представляются в виде вектора распределений на внутренней и наружной поверхностях полей температур, напряжений и деформаций, обусловленных действием внешних статических или динамических сил и тепловых источников.

$$\bar{\sigma}^{\pm} = \{\sigma_{13}^{\pm}, \sigma_{23}^{\pm}, \sigma_{33}^{\pm}, u_1^{\pm}, u_2^{\pm}, u_3^{\pm}\},$$

Модель позволяет численными методами определять значения параметров трехмерного напряженно-деформированного состояния (НДС) силовых конструкций из неоднородных материалов с переменными физико-механическими свойствами при воздействии факторов внешней среды.

В качестве исходных уравнений для расчета НДС многослойной оболочки принимаются трехмерные уравнения движения, соотношения Коши для деформаций и закона Гука, полученные из известных нелинейных уравнений [1] при допущении, что деформации  $\varepsilon_{13}$ ,  $\varepsilon_{23}$ ,  $\varepsilon_{33}$  являются линейными функциями перемещений.

Из исходной линейной системы уравнений получаем линеаризованную, разрешенную относительно шести функций параметров НДС  $\bar{\sigma} = \{\sigma_{13}, \sigma_{23}, \sigma_{33}, u_1, u_2, u_3\}$ , и характеризующую поведение предварительно нагруженной цилиндрической оболочки, находящейся в отклоненном состоянии в результате термосилового нагружения. Поскольку полученные уравнения, описывающие дополнительное напряженно-деформированное состояние предварительно нагруженных оболочек, имеют такую же структуру, как и уравнения без предварительного нагружения [2], то для их решения используются аналогичные методы. Рассмотрим многослойную оболочку, отнесенную к криволинейной ортогональной системе координат  $x_1, x_2, x_3$ .

Для каждого слоя оболочки считаем справедливыми следующие модели:

1) уравнения движения:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_1} [\sigma_{11}(1 + e_{11})H_2 H_3] + \sigma_{11} \left( \frac{1}{2} e_{12} + \omega_3 \right) \frac{\partial H_1}{\partial x_2} H_3 + \sigma_{11} \left( \frac{1}{2} e_{13} - \omega_2 \right) \frac{\partial H_1}{\partial x_3} H_2 + \\ & \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \sigma_{22} \left( \frac{1}{2} e_{12} - \omega_3 \right) H_1 H_3 \right] - \sigma_{22} (1 + e_{22}) \frac{\partial H_2}{\partial x_1} H_3 + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \sigma_{12} \left( \frac{1}{2} e_{12} - \omega_3 \right) H_2 H_3 \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \sigma_{12} (1 + e_{11}) H_1 H_3 \right] + \sigma_{12} (1 + e_{22}) \times \frac{\partial H_2}{\partial x_1} H_3 - \sigma_{12} \left( \frac{1}{2} e_{12} + \omega_3 \right) \frac{\partial H_1}{\partial x_2} H_3 + \\ & + \sigma_{12} \left( \frac{1}{2} e_{23} + \omega_1 \right) \frac{\partial H_1}{\partial x_3} H_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} (\sigma_{13} H_1 H_2) + \sigma_{13} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} H_2 - \sigma_{33} \times \frac{\partial H_3}{\partial x_1} H_2 \\ & + (F_1 - \rho \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2}) H_1 H_2 H_3 = 0; \end{aligned} \quad (1 \rightarrow 2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \sigma_{11} \left( \frac{1}{2} e_{13} - \omega_2 \right) H_2 H_3 \right] - \sigma_{11} (1 + e_{11}) \frac{\partial H_1}{\partial x_3} H_2 + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \sigma_{22} \left( \frac{1}{2} e_{23} + \omega_1 \right) H_1 H_3 \right] - \\ & - \sigma_{22} (1 + e_{22}) \times \frac{\partial H_2}{\partial x_3} H_1 + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \sigma_{12} \left( \frac{1}{2} e_{23} + \omega_1 \right) H_2 H_3 \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \sigma_{12} \left( \frac{1}{2} e_{13} - \omega_2 \right) H_1 H_3 \right] - \\ & - \sigma_{12} \left( \frac{1}{2} e_{12} - \omega_3 \right) \frac{\partial H_1}{\partial x_3} H_2 - \sigma_{12} \times \left( \frac{1}{2} e_{12} + \omega_3 \right) \frac{\partial H_2}{\partial x_3} H_1 + \frac{\partial}{\partial x_1} (\sigma_{13} H_2 H_3) + \\ & + \frac{\partial H_3}{\partial x_1} H_2 + \frac{\partial}{\partial x_2} (\sigma_{23} H_1 H_3) + \sigma_{23} \frac{\partial H_3}{\partial x_2} H_1 + (F_3 - \rho \frac{\partial^2 U_3}{\partial t^2}) \times H_1 H_2 H_3 = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

2) соотношения для деформации:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= e_{11} + \frac{1}{2} [e_{11}^2 + (\frac{1}{2} e_{12} + \omega_3)^2 + (\frac{1}{2} e_{13} + \omega_2)^2]; & (1 \rightarrow 2) \\ \varepsilon_{12} &= e_{12} + e_{11} (\frac{1}{2} e_{12} + \omega_3) + e_{22} (\frac{1}{2} e_{12} + \omega_3) + (\frac{1}{2} e_{13} + \omega_2) (\frac{1}{2} e_{23} + \omega_1); \\ \varepsilon_{33} &= e_{33}; \quad \varepsilon_{13} = e_{13}; \quad \varepsilon_{23} = e_{23}, & (2) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} e_{11} &= \frac{1}{H_1} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial x_2} u_2 + \frac{1}{H_1 H_3} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} u_3; & (1 \rightarrow 2, 3) \\ 2\omega_1 + \frac{1}{H_1 H_3} \left[ \frac{\partial}{\partial x_2} (H_3 u_3) - \frac{\partial}{\partial x_3} (H_3 u_2) \right]. & (1 \rightarrow 2, 3) \end{aligned} \quad (3)$$

3) выражения закона Гука (слои являются ортотропными):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \alpha_{11} \sigma_{11} + \alpha_{12} \sigma_{22} + \alpha_{13} \sigma_{33} + \alpha_{16} \sigma_{12}; \\ \varepsilon_{12} &= \alpha_{16} \sigma_{11} + \alpha_{26} \sigma_{22} + \alpha_{36} \sigma_{33} + \alpha_{66} \sigma_{12}; \\ \varepsilon_{13} &= \alpha_{45} \sigma_{23} + \alpha_{56} \sigma_{13}. \end{aligned} \quad (1 \rightarrow 2, 3) \quad (4)$$

Систему уравнений (1) - (4) дополним: условиями на граничных поверхностях оболочки при  $x_1 = x_1^*$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{11} (1 + e_{11}) + \sigma_{12} \left( \frac{1}{2} e_{12} + \omega_3 \right) &= \sigma_{11}^*; \\ \sigma_{11} \left( \frac{1}{2} e_{12} + \omega_3 \right) + \sigma_{12} (1 + e_{22}) &= \sigma_{12}^*; \\ \sigma_{11} \left( \frac{1}{2} e_{13} + \omega_2 \right) + \sigma_{12} \left( \frac{1}{2} e_{23} + \omega_1 \right) + \sigma_{13} &= \sigma_{13}^*; \\ u_1 = u_1^*, \quad u_2 = u_2^*, \quad u_3 = u_3^*, & (1 \rightarrow 2); \end{aligned} \quad (5)$$

и при  $x_3 = x_3^\pm$ ;  $\sigma_{13} = \sigma_{13}^\pm$ ;  $\sigma_{23} = \sigma_{23}^\pm$ ;  $\sigma_{33} = \sigma_{33}^\pm$ ;  $u_1 = u_1^\pm$ ;  $u_2 = u_2^\pm$ ;  $u_3 = u_3^\pm$ ;  
условиями идеального механического контакта слоев, при

$$\begin{aligned} x_3 = x_{3,\ell} : \quad \sigma_{13,\ell} &= \sigma_{13,\ell+1}; \quad \sigma_{23,\ell} = \sigma_{23,\ell+1}; \quad \sigma_{33,\ell} = \sigma_{33,\ell+1}; \\ u_{13,\ell} &= u_{13,\ell+1}; \quad u_{2,\ell} = u_{2,\ell+1}; \quad u_{3,\ell} = u_{3,\ell+1}, \end{aligned} \quad (1 \rightarrow 2); \quad (6)$$

а также начальными условиями:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} (1 + e_{11}) + \sigma_{12} \left( \frac{1}{2} e_{12} + \omega_3 \right) &= \sigma_{11}^*; \\ \sigma_{11} \left( \frac{1}{2} e_{12} + \omega_3 \right) + \sigma_{12} (1 + e_{22}) &= \sigma_{12}^*; \end{aligned} \quad (1 \rightarrow 2); \quad (7)$$



$$u_i = \begin{cases} u_i \\ t=0 \end{cases}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial t_1} = \begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial t_1} \\ t=0 \end{cases}; \quad (1 \rightarrow 2,3) \quad (8)$$

В формулах (1) - (8) ( $\sigma_{11}, \dots, \sigma_{33}$ ), ( $\varepsilon_{11}, \dots, \varepsilon_{33}$ ), ( $u_1, u_2, u_3$ ), ( $F_1, F_2, F_3$ ), ( $\alpha_{11}, \dots, \alpha_{66}$ ),  $\rho$  – соответственно, напряжения, деформации, перемещения, объемные нагрузки, коэффициенты податливости, плотность,  $H_1, H_2, H_3$  – коэффициенты Ляме.

Уравнения (1) – (3), (5) получены из известных нелинейных уравнений [1] при допущении о том, что деформации  $\varepsilon_{13}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{33}$  являются линейными функциями перемещений.

Считаем, что оболочка имеет предварительное НДС, возникающее под действием статических нагрузок. В результате приложения дополнительных импульсных нагрузок, тепловых потоков оболочка получает отклонение от предварительного напряженно-деформированного состояния.

Полное НДС оболочки представим в виде

$$X_{\Sigma} = X_0 + X(t),$$

$$X = \{(\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{22}, \sigma_{23}, \sigma_{33}), (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{33}), (u_1, u_2, u_3)\}, \quad (9)$$

где  $X_0$  – вектор компонент предварительного НДС;  $X(t)$  – вектор компонент дополнительного НДС, возникающего при отклонении конструкции от предварительного состояния в результате действия импульсных нагрузок и тепловых потоков.

Подставив выражения (9) в уравнения (1) - (8), вычтя из полученных выражений для суммарного НДС уравнения, описывающие предварительное напряженно-деформированное состояние и, следовательно, тождественно удовлетворяющиеся, получим соотношения, описывающие поведение оболочки в отклоненном состоянии.

В отклоненных состояниях, достаточно близких к предварительному НДС, дополнительные перемещения, деформации, напряжения в оболочке малы, поэтому нелинейными слагаемыми можно пренебречь и ограничиться линейными. Полагая, кроме того, перемещения и деформации оболочки в предварительном состоянии равными нулю и разрешив полученную систему уравнений относительно шести функций  $\bar{\sigma} = \{ \sigma_{13}, \sigma_{23}, \sigma_{33}, u_1, u_2, u_3 \}$ , используя преобразования, приведенные в [2], приходим для каждого слоя оболочки к системе уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} = & L_1 - \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \frac{H_2}{H_1} \sigma_{11,0} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial H_1}{\partial x_2} u_2 + \frac{\partial H_1}{\partial x_3} u_3 \right) \right. \\ & - \frac{1}{H_1^2 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial x_2} \sigma_{22,0} \times \left( \frac{\partial H_1}{\partial x_2} u_1 + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} - \frac{1}{H_2} \right) - \frac{1}{H_1^2} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} \sigma_{11,0} \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} - \frac{\partial H_1}{\partial x_3} u_1 \right) + \\ & + \frac{1}{H_1^2 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} \sigma_{11,0} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{1}{H_1} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} u_1 + \frac{\partial H_2}{\partial x_3} - \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \sigma_{12,0} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. \frac{1}{H_2} \frac{\partial H_1}{\partial x_2} u_2 + \frac{\partial H_1}{\partial x_3} u_3 \right) \right] + \frac{1}{H_1^2 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} \sigma_{12,0} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_1} - \frac{1}{H_2} \frac{\partial H_1}{\partial x_2} u_1 \right) - \right. \\ & \left. \frac{1}{H_1 H_2^2} \frac{\partial H_1}{\partial x_2} \sigma_{12,0} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} - \frac{1}{H_1} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} u_1 + \frac{\partial H_2}{\partial x_3} u_3 + \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} \sigma_{12,0} \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_2} - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. \frac{\partial H_2}{\partial x_3} u_3 \right) \frac{1}{H_1 H_2^2} \frac{\partial H_1}{\partial x_2} \sigma_{12,0} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} - \frac{1}{H_1} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} u_1 + \frac{\partial H_2}{\partial x_3} u_3 + \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} \sigma_{12,0} \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_2} - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. \frac{\partial H_2}{\partial x_3} u_3 \right) \right) \right] \frac{\partial H_2}{\partial x_3} u_3 \right) \end{aligned} \quad (1 \rightarrow 2);$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} = & L_3 + \frac{1}{H_1^2} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} \sigma_{11,0} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial H_1}{\partial x_2} + \frac{\partial H_1}{\partial x_3} u_3 - \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \frac{H_2}{H_1} \sigma_{11,0} \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\partial H_1}{\partial x_3} u_1 \right) \right] + + \frac{1}{H_2^2} \frac{\partial H_2}{\partial x_3} \sigma_{22,0} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} u_1 + \frac{\partial H_2}{\partial x_3} u_3 \right) - \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \frac{H_1}{H_2} \sigma_{22,0} \right. \\ & \left. \left( - \frac{\partial H_2}{\partial x_3} u_2 + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \right] + + \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial x_3} \sigma_{12,0} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \frac{1}{H_1} \frac{\partial H_2}{\partial x_1} u_2 \right) + \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial x_3} \sigma_{12,0} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_1} - \right. \\ & \left. \frac{1}{H_2} \frac{\partial H_1}{\partial x_2} u_1 \right) - \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \sigma_{12,0} \times \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_2} - \frac{\partial H_2}{\partial x_3} u_2 \right) \right] - \frac{1}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \sigma_{12,0} \frac{1}{H_1} \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} - \frac{\partial H_1}{\partial x_3} u_3 \right) \right]; \\ & \frac{\partial u_1}{\partial x_3} = L_4; \quad \frac{\partial u_2}{\partial x_3} = L_5; \quad \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = L_6. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь  $L_i, i=1, \dots, 6$  – комплексы, имеющие вид правых частей в системе уравнений (4) [3];

$\sigma_{11,0}, \sigma_{12,0}, \sigma_{22,0}$  – напряжения в оболочке, вызванные ее предварительным нагружением.

Напряжения  $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}$  определяются с использованием соотношений Коши и закона Гука:

$$\begin{aligned} \sigma_{22} = & \Delta_{1,11} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \Delta_{2,11} \frac{1}{x_3} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + u_3 \right) + \sigma_{33} (-a_{13} \Delta_{1,11} - a_{23} \Delta_{2,11}) + A_{2,11} T; \\ \sigma_{12} = & \Delta_{3,12} \left( \frac{1}{x_3} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sigma_{22} = \Delta_{1,22} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \Delta_{2,22} \frac{1}{x_3} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + u_3 \right) + \sigma_{33} (-a_{13} \Delta_{1,22} - a_{23} \Delta_{2,22}) + A_{2,22} T.$$

Коэффициенты при производных в уравнениях (11) определяются физико-механическими параметрами слоев:

$$\begin{aligned} \Delta_{1,11} = & \frac{a_{22} a_{66}}{\Delta}; \quad \Delta_{2,11} = \frac{a_{12} a_{66}}{\Delta}; \quad \Delta_{1,22} = \frac{a_{12} a_{66}}{\Delta}; \quad \Delta_{2,22} = \frac{a_{11} a_{66}}{\Delta}; \quad \Delta_{3,12} = \frac{a_{11} a_{22} - a_{12}^2}{\Delta}; \\ \Delta = & (a_{11} a_{22} - a_{12}^2) a_{66}; \quad A_{2,11} = -\alpha_{11} \Delta_{1,11} - \alpha_{22} \Delta_{2,11}; \quad A_{2,22} = -\alpha_{11} \Delta_{1,22} - \alpha_{22} \Delta_{2,22}, \\ a_{11} = & \frac{1}{E_{11}}; \quad a_{12} = \frac{\nu_{21}}{E_{22}}; \quad a_{13} = \frac{\nu_{31}}{E_{33}}; \quad a_{23} = -\frac{\nu_{32}}{E_{33}}; \quad a_{33} = \frac{1}{E_{33}}; \\ a_{44} = & \frac{1}{G_{23}}; \quad a_{55} = \frac{1}{G_{13}}; \quad a_{66} = \frac{1}{G_{12}}; \end{aligned} \quad (12)$$

Полное напряженно-деформированное состояние многослойной оболочки является суммой предварительного и дополнительного, определяемого из решения систем уравнений (10), (11).

В уравнениях (11) - (12) ( $E_{11}, E_{22}, E_{33}$ ), ( $\alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{33}$ ) – соответственно, модули упругости, коэффициенты линейного температурного расширения для направлений  $x_1, x_2, x_3$ ; ( $G_{12}, G_{13}, G_{23}$ ), ( $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ ) – модули сдвига и коэффициенты Пуассона.

Для распространенных в практике цилиндрических оболочек силовых конструкций компоненты действующих на оболочку нагрузок, полей температур и функции параметров НДС раскладываются в двойные тригонометрические ряды по продольной и окружной координатам:

$$\begin{aligned} \{u_1, \sigma_{13}, \sigma_{13}^\pm\} = & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \{u_{1,mn}, \sigma_{13,mn}, \sigma_{13,mn}^\pm\} \cos \frac{m\pi}{l} x_1 \cos nx_2; \\ \{u_2, \sigma_{23}, \sigma_{23}^\pm\} = & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \{u_{2,mn}, \sigma_{23,mn}, \sigma_{23,mn}^\pm\} \sin \frac{m\pi}{l} x_1 \sin nx_2; \\ \{u_3, \sigma_{33}, \sigma_{33}^\pm\} = & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \{u_{3,mn}, \sigma_{33,mn}, \sigma_{33,mn}^\pm\} \sin \frac{m\pi}{l} x_1 \cos nx_2, \end{aligned} \quad (13)$$

а производные по времени – в конечные разности

$$\frac{\partial^2 \bar{\sigma}}{\partial t^2} = \frac{2\sigma(t_s) - 5\sigma(t_{s-1}) + 4\sigma(t_{s-2}) - \sigma(t_{s-3})}{\tau^2}; \quad \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} = \frac{3\sigma(t_s) - 4\sigma(t_{s-1}) + \sigma(t_{s-2})}{2\tau}. \quad (14)$$

После подстановки результатов разложения в исходную систему уравнений для расчета полного НДС многослойных оболочек получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений для пары волновых чисел  $m$  и  $n$  для каждого шага по времени. Осуществляя интегрирование полученной системы уравнений с использованием метода дискретной ортогонализации, позволяющего автоматически удовлетворять условиям идеального механического контакта слоев, а также суммируя тригонометрические ряды разложения напряжений  $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}, \sigma_{13}, \sigma_{23}, \sigma_{33}$ , получаем решение задачи о трехмерном НДС многослойной оболочки с высокой степенью точности.

Блок-схема расчета НДС многослойных оболочек при действии статических, динамических нагрузок, высокоинтенсивных тепловых потоков приведена на рисунке.

Для ее реализации выполняются следующие операции.

1. Задаются параметры конструкции:

а) физико-механического свойства каждого слоя:

$(E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, \rho, C_p)_k, (\alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{33})_k$ ;

б) геометрические параметры –  $(\ell, R_-, R_+, h_k)$ .

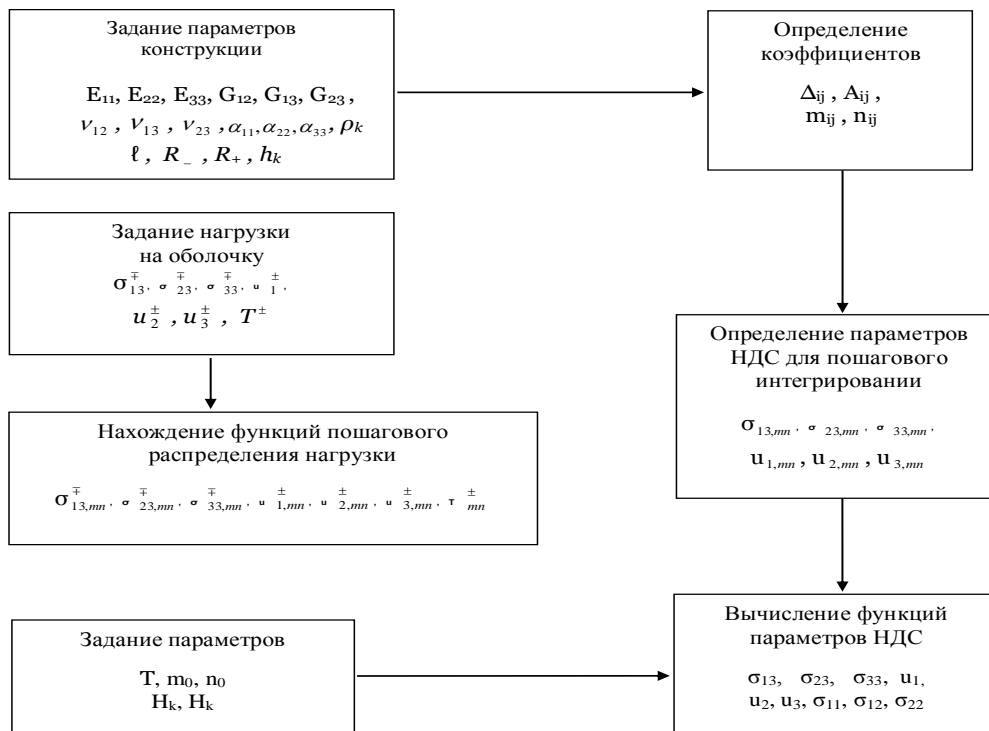
2. По известным параметрам конструкции определяются необходимые постоянные коэффициенты при производных:  $\Delta_{ij}, A_{ij}, m_{ij}, n_{ij}$ .

3. Задаются параметры нагрузок, действующих на оболочку:

$\sigma_{13}^{\mp}, \sigma_{23}^{\mp}, \sigma_{33}^{\mp}, u_1^{\pm}, u_2^{\pm}, u_3^{\pm}, T^{\pm}$

4. По заданным параметрам нагрузок находятся функции:

$\sigma_{13, mn}^{\mp}, \sigma_{23, mn}^{\mp}, \sigma_{33, mn}^{\mp}, u_{1, mn}^{\pm}, u_{2, mn}^{\pm}, u_{3, mn}^{\pm}, T_{mn}^{\pm}$



Блок-схема решения задачи

5. Задается шаг интегрирования по времени  $\tau$ , число шагов интегрирования по времени, диапазоны изменения чисел  $m$  и  $n$  ( $m = 1 \div m_0$ ,  $n = 0 \div n_0$ ), число точек интегрирования по толщине каждого слоя  $H_k$ , число точек ортогонализации для каждого слоя  $H_k$ .

6. Проводится интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений для каждого слоя оболочки, в результате которого находятся функции:

$$\sigma_{13, mn}, \sigma_{23, mn}, \sigma_{33, mn}, u_{1, mn}, u_{2, mn}, u_{3, mn}, (m = 1 \div m_0, n = 1 \div n_0).$$

7. В заданных точках многослойной конструкции находятся функции  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$ ,  $\sigma_{33}$ ,  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ , а также  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{22}$ , путем суммирования соответствующих рядов Фурье.

Таким образом, предложенная модель и алгоритм ее реализации на ЭВМ позволяют определять и анализировать техническое состояние многослойных несущих конструкций летательных аппаратов и других объектов машиностроения по параметрам трехмерного напряженно-деформированного состояния при различных пространственно-временных законах распределения внешней нагрузки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. М.: Гостехиздат, 1984. 212 с.
2. Григоренко Я.М. Статика анизотропных толстостенных оболочек / Я.М. Григоренко, А.Т. Василенко, Н.Д. Панкратова. Киев: Вища школа, 1985. 190 с.
3. Бакулин В.Н. Использование уравнений трехмерной теории упругости для решения задач динамики многослойных оболочек / В.Н. Бакулин // Известия вузов. Авиационная техника. 1985. № 3. С.7-12.

#### **Осяев Олег Геннадьевич –**

кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель кафедры материаловедения Ростовского военного института ракетных войск

#### **Нейдорф Рудольф Анатольевич –**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 11.10.10, принята к опубликованию 27.10.10*

УДК 519.23+681.3

**Л.Ю. Богданов**

### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БИНАРНЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ МЕТОДОМ ROC-АНАЛИЗА**

*Рассматриваются логистические регрессионные модели и их применение в качестве бинарных классификаторов. Предлагается методика оценки предсказательной способности таких классификаторов с помощью аппарата ROC-анализа. Приведены результаты практического использования методики. Показаны пути дальнейшего улучшения представленного метода.*

Логистическая регрессия, ROC-анализ, ROC-кривые, предсказательная способность, точка отсечения

L.Y. Bogdanov

## THE EVALUATION OF PERFORMANCE OF BINARY CLASSIFIERS BASED ON LOGISTIC REGRESSION USING ROC ANALYSIS

*Logistic regression models and their usage as binary classifiers are considered. A technique of performance evaluation of derived classifiers utilizing ROC analysis is proposed. The results of practical use of the technique are given. The ways of further improvement of the technique are mentioned.*

Logistic regression, ROC analysis, ROC curves, classifier performance, cutoff value

Регрессионный анализ является одним из основных статистических инструментов, который позволяет определить наличие и характер связи между зависимой переменной (откликом, выходом) и независимыми переменными (факторами, предикторами, входами), предсказывать значения отклика с помощью значений предикторов, вычислить вклад входов в вариацию выхода [2]. Классический регрессионный анализ, основанный на методе наименьших квадратов, требует выполнения слишком многих условий, что иногда ограничивает его применение на практике.

Логистическая регрессия во многом является естественным дополнением классической линейной регрессии. Ее применяют, когда имеется подчиняющаяся биномиальному закону распределения бинарная (дихотомическая) зависимая переменная, например, наличие или отсутствие симптома (заболевания) у пациента, и набор независимых переменных, измеряемых в смешанных шкалах. Поскольку отклик бинарен, то допущения, лежащие в основе линейной регрессии, не выполняются. Более того, нельзя интерпретировать предсказанные значения, которые не равны нулю или единице. Вместо этого прогнозируют вероятность  $P$  того, что входная переменная должна быть отнесена к определенному классу. В последние годы модели прогнозирования значений зависимой переменной на основе множественной логистической регрессии получают все большее распространение в различных областях: медицине, финансовой сфере, маркетинге, социологии, управлении и принятии решений и других [1].

Рассмотрим совокупность  $p$  независимых переменных, обозначенных вектором  $\mathbf{x}' = (x_1, x_2, \dots, x_p)$  и измеряемых, как минимум, в интервальной шкале,  $Y$  – бинарная зависимая переменная. Обозначим условную вероятность того, что  $Y$  примет значение, равное единице, как  $P(Y=1|\mathbf{x}) = \pi(\mathbf{x})$ . Логистическое (логит) преобразование модели множественной логистической регрессии определяется выражением

$$g(\mathbf{x}) = \ln \left[ \frac{\pi(\mathbf{x})}{1 - \pi(\mathbf{x})} \right] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p, \quad (1)$$

а модель логистической регрессии выглядит как

$$\pi(\mathbf{x}) = \frac{e^{g(\mathbf{x})}}{1 + e^{g(\mathbf{x})}}. \quad (2)$$

Важность преобразования  $g(\mathbf{x})$  заключается в том, что ему присущ ряд привлекательных свойств линейной регрессионной модели:  $g(\mathbf{x})$  линейно по параметрам, является непрерывным и принимает значения на интервале  $(-\infty; +\infty)$ .

В соответствии с определением вероятности для величины  $\pi(\mathbf{x})$  должно выполняться неравенство  $0 \leq \pi(\mathbf{x}) \leq 1$ . Свойства логистической функции (2), график которой приведен на рис. 1, обеспечивают выполнение этого неравенства: при любых значениях аргумента величина функции принадлежит отрезку  $[0; 1]$ .

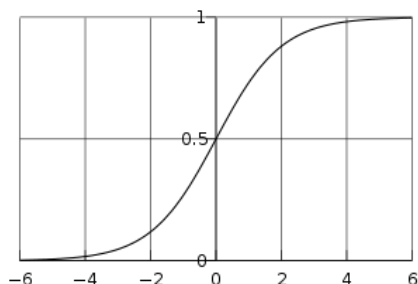


Рис. 1. График функции  $\pi(x)$

Для оценки параметров логистической регрессии используется метод максимума правдоподобия, который заключается в максимизации вероятности появления конкретной выборки при заданных наблюдаемых значениях. Если определить, какие регрессоры и как влияют на отклик, то уравнение логистической регрессии можно применять для оценки вероятности того, что событие  $Y$  наступит для конкретного испытуемого [5]. Логистическая регрессия на выходе обеспечивает вероятность отнесения входной переменной к некоторому классу. На практике удобнее применять бинарные классификаторы (диагностические тесты). Для преобразования логистической регрессии в такой классификатор необходимо задаться пороговым значением (точкой отсечения, *cutoff value*)  $y_0$  таким образом, что если значение  $y$  регрессионного уравнения при заданных величинах параметров  $\beta$  и входов  $X$  удовлетворяет неравенству  $y \geq y_0$ , то входной объект относят к одному классу (например, «здоров»), если  $y < y_0$  – к другому (к классу «болен»). Варьируя значение точки отсечения  $y_0$ , каждый раз будем получать новый бинарный классификатор. Отсюда возникает необходимость выбора из множества полученных тестов наиболее эффективного, обладающего наилучшей предсказательной способностью. Для решения этой задачи предлагается использовать аппарат ROC-анализа, который широко применяется для визуализации, упорядочивания и отбора классификаторов на основании их эффективности.

Длительно время ROC-кривые применялись в теории обработки сигналов и радиолокации для описания соотношений между событиями верного обнаружения сигнала (цели) и ложными срабатываниями. Затем их стали широко использовать в теории принятия решений, медицинской диагностике, кредитном скоринге.

Произвольный бинарный классификатор соотносит объект на входе одному из двух классов: «0» или «1», «положительный» или «отрицательный», «болен» или «здоров» и т.д. Таким образом, существует четыре возможных исхода: если «положительный» объект классифицирован как «положительный», то такой исход называется истинно-положительным (true positive,  $TP$ ), если как «отрицательный» – ложно-отрицательным (false negative,  $FN$ ). Если «отрицательный» объект отнесен тестом к «отрицательному» классу, такой исход зовется истинно-отрицательным (true negative,  $TN$ ), если к «положительному» – ложно-положительным (false positive,  $FP$ ).

В результате применения диагностического теста к некоторому множеству входных объектов с известными принадлежностями к классам получим следующую матрицу неточностей (таблицу сопряженности) [4].

По данным таблицы рассчитываются операционные характеристики классификатора – чувствительность  $Se$  и специфичность  $Sp$ :

$$Se = \frac{TP}{TP + FN}, \quad Sp = \frac{TN}{TN + FP}. \quad (3)$$

Вычислив эти величины, можно представить результаты применения классификатора в двумерном ROC-пространстве, где по оси ординат откладываются значения  $Se$ , а по оси абсцисс – значения  $(1 - Sp)$ .

Матрица неточностей

Предсказанный класс	Истинный класс	
	p	n
Y	$TP$	$FP$
N	$FN$	$TN$
Итого	P	N

Таким образом, тест с фиксированными операционными характеристиками (3) представляется точкой в ROC-пространстве, которое обеспечивает наглядное графическое представление о диагностической ценности классификаторов и позволяет сравнивать их по эффективности.

Идеальный тест (точка *D* на рис. 2) располагается в точке с координатами (0, 1). Такой классификатор всегда принимает истинно-положительный результат без ошибок ложной тревоги (например, относит всех больных к классу больных, не причисляя к ним здоровых). Отсюда следует, что диагностически ценные тесты находятся в левом верхнем углу ROC-пространства. Классификаторы, «расположенные» в левом нижнем углу ROC-пространства, «консервативны», т.к. при малом проценте ошибок ложной тревоги имеют низкую чувствительность. Классификаторы, «расположенные» в правом верхнем углу, «либеральны», т.к. при больших значениях истинно-положительных результатов дают также большой процент ошибок ложной тревоги.

Тесты, «расположенные» на диагонали  $Se = (1 - Sp)$  ROC-пространства (точка *C* на рис. 2), не дают дополнительную диагностическую информацию о классах, а потому бесполезны. Такие классификаторы эквивалентны классификаторам, использующим стратегию «случайного угадывания» классов. Тесты, «расположенные» ниже диагонали (например, точка *E* на рис. 2), еще хуже тех, что используют стратегию случайного угадывания. Однако такой тест легко «переводится» в точку, симметричную относительно диагонали и лежащую в левом верхнем углу, заменой стратегии принятия решений на противоположную [3].

В случае логистической регрессии каждому выбранному значению точки отсечения  $y_0$  будет соответствовать диагностический тест с присущими ему величинами чувствительности и специфичности. Изменяя величину порогового значения с некоторым шагом и откладывая в ROC-пространстве точки, получим ROC-кривую. ROC-кривая, построенная для непрерывного классификатора, показывает зависимость количества верно классифицированных положительных примеров от количества неверно классифицированных отрицательных примеров.

Для сравнения эффективности различных классификаторов часто удобно применять некоторую интегральную характеристику, в качестве которой часто используют площадь *AUC* (Area Under Curve), вычисленную под ROC-кривой.

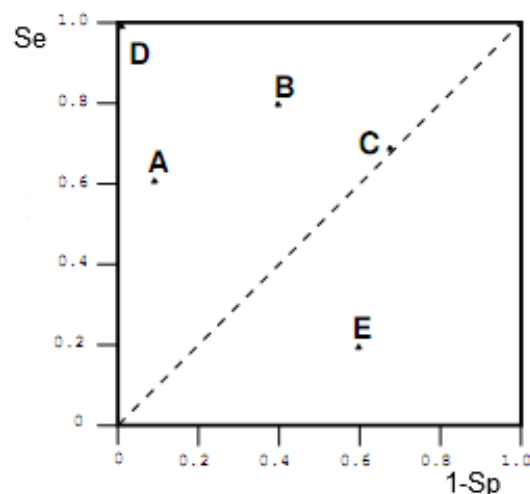


Рис. 2. Бинарные классификаторы в ROC-пространстве

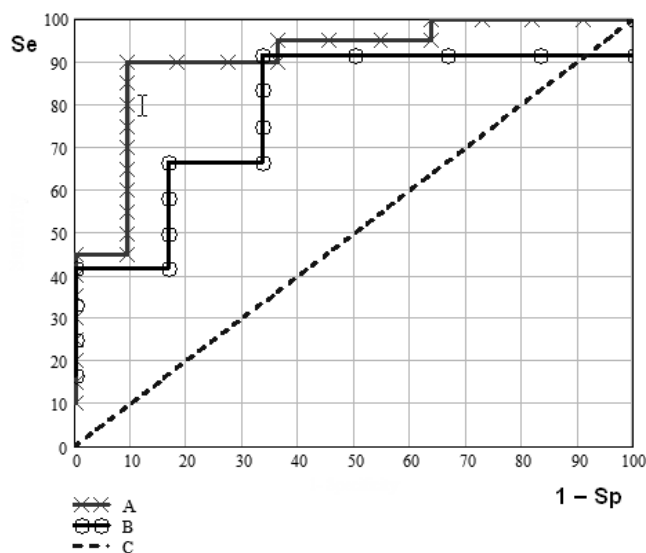


Рис. 3. Графики ROC-кривых: *A* – ROC-кривая для госпитализации через 1 год от начала наблюдений; *B* – ROC-кривая для госпитализации через 2 года

Таким образом, для нахождения оптимального значения точки отсечения  $y_0$  при преобразовании классификатора на основе логит-регрессии в диагностический тест можно использовать ROC-анализ. Оптимальное значение  $y_0$  зависит от предъявляемых к классификатору требований, т.е. от выбранного критерия оптимальности. Например, оптимальной можно считать точку на ROC-кривой, которая имеет наибольшее значение чувствительности при наименьшем значении доли ложноположительных результатов. Эта точка может быть найдена с помощью индекса Йодена ( $J$  – Youden index) как максимальное отличие ординат ROC-кривой и диагонали:

$$J = \max(Se + Sp - 1). \quad (4)$$

Пример. С помощью логистической регрессии и ROC-анализа решается задача сравнения возможности госпитализации группы больных хронической сердечной недостаточностью (ХСН) в лонгитудинальных исследованиях, проводимых над больными в течение трех лет через определенные интервалы времени. В первом периоде наблюдаются 174 пациента, число которых с каждым периодом уменьшается из-за цензурирования по различным причинам.

Исследуемая выборка содержит 29 комплектных наблюдения со следующими признаками (при поступлении): число сердечных сокращений ЧСС; систолическое артериальное давление САД; фракция выброса ФВ; С-реактивный белок СРБ; пол – мужчины.

Уравнение логистической регрессии имеет вид

$$\text{Госпитализация} = \frac{e^{g(x)}}{1 + e^{g(x)}}, \quad (5)$$

где  $g(x) = -19,48 - 0,16 \cdot \text{ЧСС} + 0,13 \cdot \text{САД} + 0,30 \cdot \text{ФВ} + 0,15 \cdot \text{СРБ} + 2,80 \cdot \text{Пол (мужчины)}$ .

Выявлено, что все регрессоры значимо влияют на необходимость госпитализации на уровне  $p < 0,15$ .

На рис. 3 представлены графики ROC-кривых для госпитализации через год (кривая  $A$ ) и через два года (кривая  $B$ ) от начала наблюдений, а также график диагностического теста, не содержащего дополнительной информации о разбиении на классы (кривая  $C$ ). Значение точки отсечения для кривой  $A$  вычислено по формуле (4) и составляет 0,4. При «наивном» подходе, это значение, вероятнее всего, выбрано равным 0,5. Сравнение площадей под кривыми ( $AUC_A = 9091$  кв. ед.,  $AUC_B = 7917$  кв. ед.) позволяет сделать вывод о том, что ранняя госпитализация благоприятнее для больного.

Терапевтическое воздействие на указанные параметры пациента (ЧСС, САД, ФВ, СРБ) дает возможность предотвратить ухудшение течения ХСН и уменьшить экономические затраты по числу госпитализаций таких пациентов.

При использовании ROC-кривых для оценивания классификаторов следует быть осторожным, делая выводы о предпочтительности определенного теста. Часто решение принимается на основе ROC-кривых, построенных по единственному множеству входных объектов, что является ошибочным. Для сравнения классификаторов по значениям их эффективности необходима мера вариабельности. Усреднение ROC-кривых является простой задачей в случае, когда доступно исходное множество примеров. Пусть имеются тестовые множества  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , полученные при кросс-валидации или бутстреп-методом, которые объединяются в одно тестовое множество  $T_m$  сортировкой слиянием по значениям, получаемым на выходе классификатора для каждого входного объекта. Для полученного множества  $T_m$  затем строится ROC-кривая. Однако такое простое слияние не решает задачу получения меры вариабельности. Необходимы более мощные методы усреднения нескольких ROC-кривых, построенных для одного диагностического теста, но на разных множествах входных объектов.

ROC-пространство является двумерным, а любое усреднение производится по одному измерению. Можно спроецировать ROC-кривые на одно измерение и определенным образом усреднить. Возникает вопрос о допустимости такого проецирования, сохранении интересных характеристик. Ответ зависит от предпосылок усреднения. Перспективными способами усред-



нения ROC-кривых являются усреднение по значениям чувствительности при фиксированных значениях специфичности, а также – по значениям точек отсечения. Данные подходы требуют дальнейшего исследования свойств и разработки алгоритмов реализации [4].

Таким образом, классификаторы на основе логистической регрессии могут использоваться для прогнозирования событий в тех случаях, когда существуют два варианта их развития. Эти классификаторы являются вероятностными, однако на практике удобнее применять диагностические тесты, непосредственно определяющие принадлежность некоторого входного объекта к одному из двух классов. Чтобы преобразовать уравнение логистической регрессии в диагностический тест, необходимо задаться пороговым значением. Аппарат ROC-анализа позволяет выбрать оптимальное пороговое значение и оценить предсказательную способность получаемого классификатора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каримов Р.Н. Статистика для врачей, биологов и не только... : монография : в 2 ч. / Р.Н. Каримов, Ю.Г. Шварц. Саратов: Сарат. гос. мед. ун-т, 2007, 2010. Ч.1. 200 с. Ч.2. 204 с.
2. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер. М.: Мир, 1980. 456 с.
3. Файнзильберг Л.С. Гарантированная оценка эффективности диагностических тестов на основе усиленного ROC-анализа / Л.С. Файнзильберг, Т.Н. Жук // Управляющие системы и машины. 2009. № 5. С. 3-13.
4. Fawcett T. ROC Graphs: Notes and Practical Considerations for Researchers / T. Fawcett. Kluwer Acad. Publ., 2004. 38 с.
5. Hosmer D.W. Applied Logistic Regression, 2<sup>nd</sup> ed. / D.W. Hosmer, S. Lemeshow. N.-Y.: Wiley, 2000. 375 с.

**Богданов Леонид Юрьевич –**

аспирант кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 20.10.10*

УДК 004.9(075)

**С.К. Дауров, В.Ю. Новиков, Н.О. Александров**

#### **КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОЯСНИЧНО-КРЕСТЦОВОГО ОТДЕЛА ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ МЕЖПОЗВОНОЧНЫХ ДИСКОВ**

*Рассматривается алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме обрабатывать поток цифровых изображений пояснично-крестцового отдела позвоночника, выдавая в качестве результата по каждому диску набор признаков, анализируя которые, врач может сделать диагностическое заключение по каждому пациенту. Программа, реализующая предложенный алгоритм, может быть настроена на разделение позвоночника пациентов на «норму» и «патологию».*

Цифровое изображение, пояснично-крестцовый отдел позвоночника, межпозвоночный диск

**S.K. Daurov, V.Y. Novikov, N.O. Alexandrov**

## **COMPUTER PROCESSING IMAGE OF THE LUMBAR-SACRAL PART FOR EXCRETION OF INTERVERTEBRAL DISKS**

*The considered algorithm allows to process in an automatic mode a stream of digital images of the lumbar-sacral part of a backbone. The algorithm gives out as result on each disk a set of attributes, analyzing which the doctor can make the diagnostic conclusion on each patient. The program realizing offered algorithm, can be adjusted on division of backbones of patients into "norm" and "pathology".*

Digital image, the lumbar-sacral part of a backbone, the intervertebral disk

Медицина является наиболее благодатной областью для применения компьютерных технологий. Данная работа предлагает компьютерную обработку межпозвоночных дисков пояснично-крестцового отдела позвоночника с целью оценки их состояния и диагностики заболеваний.

Исходными данными являются цифровые изображения пояснично-крестцового отдела позвоночника, полученные на компьютерном томографе, результатом обработки – выделенные микроизображения с межпозвоночными дисками и соответствующим набором признаков, характеризующих каждый диск.

При разработке программного комплекса, осуществляющую компьютерную обработку, решены следующие задачи: оценка качества изображения для входного контроля, выбор метода определения пространственного положения позвоночного столба по степени изменчивости яркости в вертикальном срезе изображения, определение положения позвонков и, следовательно, межпозвоночных дисков, выделение микроизображений с дисками и вычисление совокупности признаков.

### **Входной контроль качества изображения**

Контроль качества изображения осуществляется для оценки пригодности изображения к дальнейшему использованию. Для этой цели используется интегральный критерий качества, включающий оценку уровня адаптации зрительной системы, показатель полноты использования в изображении градаций яркостей, оценку резкости и обобщенный контраст изображения [1].

### **Определение пространственного положения позвоночного столба**

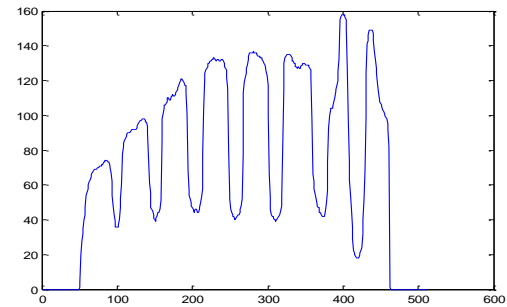
Анализ исходного изображения (рис. 1 а) позволяет сделать вывод, что поиск позвоночного столба наиболее целесообразно осуществлять по степени изменчивости яркости в вертикальном срезе изображения.

Процедура поиска включает ряд операций. На начальном этапе выполняется вертикальное сканирование изображения с фиксированным шагом по горизонтали. Вертикальный срез позвоночного столба представляет собой одномерную функцию с некоторым числом локальных выбросов, соответствующих позвонкам, а провалы между ними – межпозвоночным дискам (рис. 1 б).

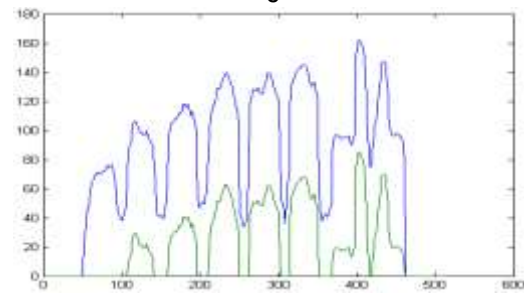
Следующая задача – определение числа выбросов, для этого необходимо аналоговую функцию среза преобразовать в импульсный сигнал, в котором импульсы соответствуют позвонкам, интервалы между ними – дискам. Однако процесс преобразования представляет собой сложную задачу, например, наиболее очевидный вариант решения этой задачи – определение среднего уровня функции и вычитание его из функции среза (рис. 1 в).



а

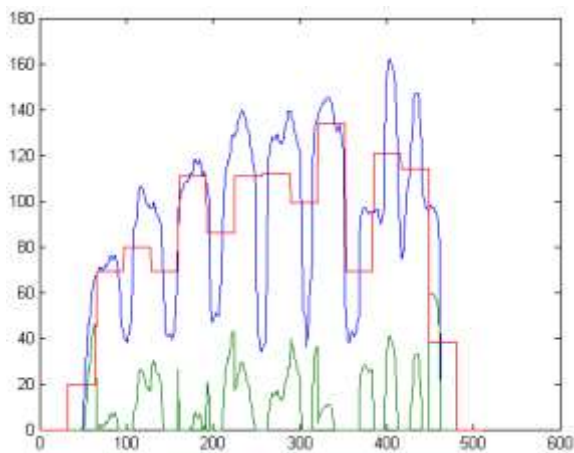


б

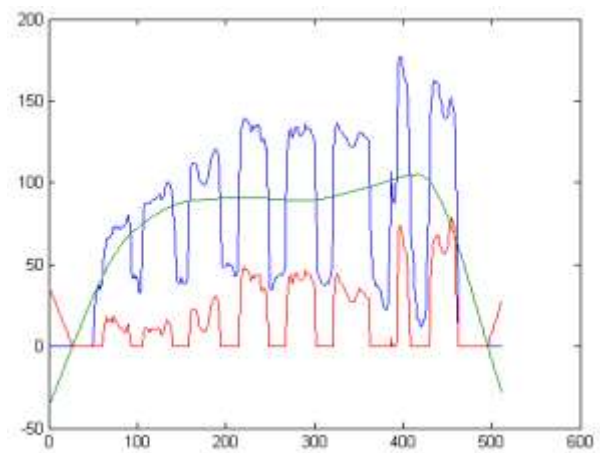


в

Рис. 1. Анализ изображения: а – исходное изображение; б – функция в вертикальном срезе; в – разность функции среза и среднего уровня (нижний график)



а



б

Рис. 2. Разности при использовании: а – ступенчатого среднего; б – интерполированного среднего

Анализ результата показывает, что в этом случае может отсутствовать первый (самый левый) выброс, что недопустимо. Чтобы исключить потерю крайних всплесков следует уменьшить диапазон определения среднего, например весь диапазон изменения аргумента можно разбить на некоторое число частей ( $k$ ), в пределах каждого из которых вычисляется среднее (2а). Недостаток этого решения следует из ступенчатости среднего, в-частности, выбросы деформируются – уменьшается ширина всплесков ( $k=4$ ), либо на месте одного всплеска возникают несколько узких ( $k=16$ ). Поэтому необходимо устранить ступенчатость среднего, для этого используем кубическую интерполяцию кусочного среднего (рис. 2 б). Полученный результат вполне удовлетворителен – потери всплесков или их искажения не происходит. Теперь можно выполнить преобразование разностного сигнала в импульсный, для этого положительные величины заменяются на 1, а нулевые и отрицательные значения – на 0.

Для определения количества всплесков продифференцируем импульсный сигнал, что позволяет определить положения передних и задних фронтов импульсов. Для исключения вычисления ложных импульсов (см. узкий импульс в районе 380), необходимо узкие импульсы шириной менее 30 пикселей найти и устранить.

Таким образом, в результате вертикального сканирования изображения получим одномерную функцию зависимости числа выбросов от горизонтальной координаты среза. Анализ этой функции позволяет определить левую и правую границы позвоночного столба.

### Определение центров межпозвоночных дисков и их выделение

Так как известны вертикальные координаты верхних и нижних краев позвонков, то несложно определить вертикальные координаты середин межпозвоночных дисков в каждом вертикальном срезе, которые отмечаются белыми точками (рис. 3 а). Далее, используя отмеченные точки середин дисков, определяют координаты центров межпозвоночных дисков, вырезают микроизображения с дисками и записывают в виде отдельных файлов [2].

Анализ работы программы определения центров позвоночных дисков (рис. 3 б) позволяет сделать вывод о вполне удовлетворительных результатах. Наличие неточностей в определении линейных координат центров, а также обнаружение ложных центров не снижает достоинств разработанной программы, т.к. все это промежуточные результаты.

### Формирование совокупности признаков

Формирование совокупности признаков, характеризующих состояние диска, осуществляется в контакте со специалистами и на данный момент включает: средний уровень яркости, среднеквадратичное отклонение уровня яркости от среднего и др. В целом этот вопрос находится в стадии активной разработки.

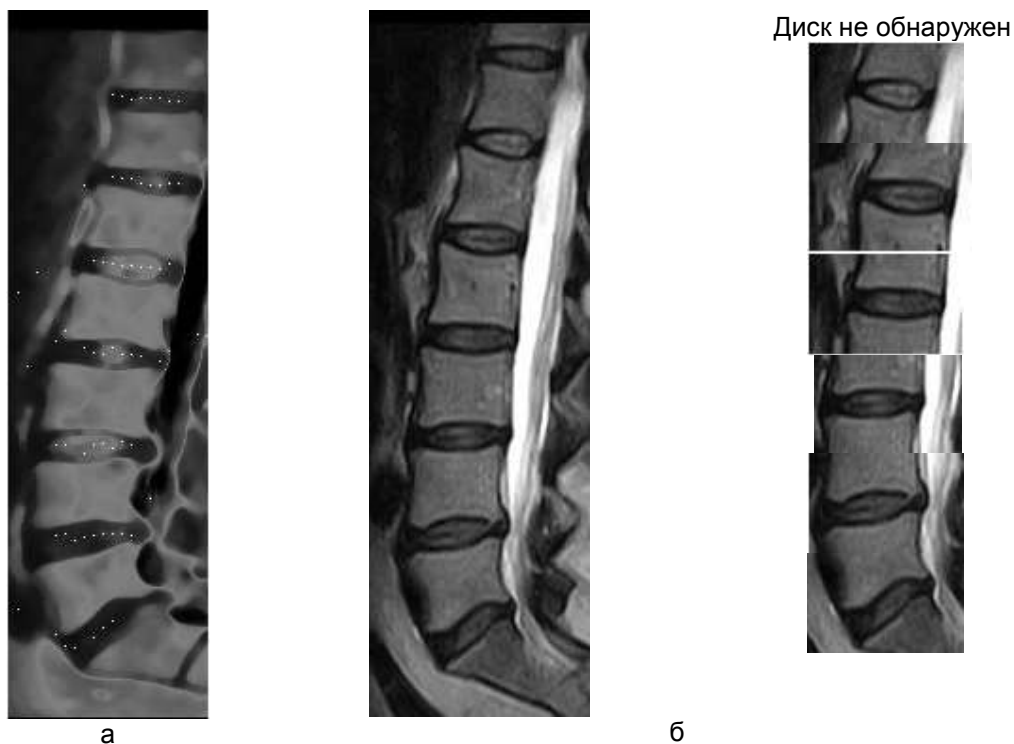


Рис. 3. Позвоночный столб: а – с отмеченными точками; б – позвоночный столб исходного изображения и выделенные микроизображения с дисками

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вробель Р.А. Метод количественной оценки качества рентгенографических изображений / Р.А. Вробель, И.М. Журавель, Н.В. Опыр // Неразрушающий контроль и техническая диагностика – 2000 : тр. Третьей Украинской науч.-техн. конф. Днепропетровск. С.233 - 236.
2. Методы компьютерной обработки изображения / под ред. В.А Сойфера. М.: Физматлит, 2001.

**Дауров Станислав Константинович –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Новиков Василий Юрьевич –**

студент Саратовского государственного технического университета

**Александров Никита Олегович –**

студент Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

УДК 004.942

**Н.С. Ляпина, С.И. Суятинов**

### **МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПО СКРЫТЫМ ВЗАИМОСВЯЗЯМ**

*Рассмотрена задача идентификации и прогнозирования состояния человека на примере развития язвенной болезни. В качестве прогностических параметров используются результаты психологического тестирования людей и характер их профессиональной деятельности. Осуществлен выбор наиболее значимых признаков.*

Идентификация состояния, прогнозирование, скрытые взаимосвязи, язвенная болезнь, психологическое тестирование

**N.S. Lyapina, S.I. Suyatinov**

### **METHOD OF PREDICTION OF THE HUMAN STATES DEVELOPMENT ON THE LATENT INTERRELATIONS**

*The problem of identification and prediction of human states is researching for example of ulcerous illness. Results of psychological testing of people and the nature of its professional activity are used as prognostic parameters. The choice of most significant factors is fulfilled.*

Identification of the state, forecasting, latent interrelations, peptic ulcer, psychological testing

Важной задачей охраны здоровья является оценка подверженности человека хроническим заболеваниям, идентификация их на ранней стадии и прогноз развития в зависимости от различных факторов. Однако если для идентификации заболеваний можно использовать характерные симптомы, то для прогнозирования необходимо выявлять причины, способствующие их появлению. Например, известно, что психологическое напряжение и стрессовые ситуации могут явиться причинами такого серьезного недуга, как язвенная болезнь [1]. При этом большое влияние на формирование психологических характеристик человека оказывает характер работы. Особенно это относится к тем людям, чья профессия связана с нервно-психическими нагрузками. Кроме того, социально-бытовые условия человека также определяют его психику, т.е. текущее психическое состояние человека обуславливается его врожденными свойствами, воспитанием, характером работы, семейными отношениями и т.п. Поэтому актуальной является оценка степени влияния различных психологических характеристик на возникновение и развитие язвенной болезни.

Пусть имеются данные исследования следующих групп людей с известными показателями  $a_i$ : 1) здоровые люди, работающие в условиях стресса; 2) здоровые люди, работающие в нормальных условиях; 3) имеющие язву люди, работающие в условиях стресса; 4) имеющие язву люди, работающие в нормальных условиях.

В качестве параметров  $a_i$  использованы результаты психологического тестирования, в которых оценивались: сила нервных процессов; уравновешенность нервных процессов; выраженность эмоционального стресса; уровень снижения работоспособности; социальная адаптация Холмса; Торонтская шкала.

Рассмотрены следующие две задачи: оценка вероятности возникновения язвенной болезни и оценка длительности заживления язвы.

Сложность рассматриваемых задач обуславливается скрытыми взаимосвязями между психофизиологическими параметрами испытуемого, стажем и характером работы, с одной стороны, и вероятностью возникновения заболевания – с другой. Кроме того, выбранные показатели частично противоречивы. Действительно, на практике известны случаи, когда среди людей с одинаковой психикой и одинаковым характером работы регистрировались случаи возникновения и отсутствия язвенной болезни. Это объясняется другими характеристиками человека (морфологическими, биохимическими критериями и т.д.), но эти параметры не всегда можно быстро оценить, поэтому для целей экспресс-анализа были выбраны вышперечисленные показатели. Однако учет дополнительных параметров (в случае их известных значений) позволит повысить вероятность прогноза [2]. Кроме того, в исследованиях учитывался характер и стаж работы, а также генетическая устойчивость человека (в частности, наследственность). Все эти данные также могут быть легко получены без специального медицинского исследования.

Поскольку поставленные задачи относятся к распознаванию образов с учителем, для их решения применялся дискриминантный анализ [3], при этом протестированы 2 группы по 75 человек: здоровые и больные язвенной болезнью. Среди обеих групп были люди, работающие в нормальных условиях и в условиях стресса (табл. 1).

По результатам, приведенным в табл. 1, можно сделать ряд выводов: 1) учет наследственности позволяет повысить точность прогноза, в т.ч. для группы здоровых людей, более чем на 15% (п. 1 и 2); 2) питание не является определяющим фактором (п. 2 и 3); 3) учет длительности работы (стажа) (п. 2 и 4) в среднем повышает точность прогноза возникновения язвенной болезни; 4) психологические параметры оказывают различное влияние на правильную классификацию. Лишним психологическим параметром оказалась сила нервных процессов (п. 5), а наиболее важным признаком – уравновешенность (п. 6).

Проведенные исследования показали достаточно высокий процент правильного распознавания, что свидетельствует об устойчивой взаимосвязи между выбранными признаками и наличием заболевания. Отметим, что в рассматриваемых задачах используются только косвенные признаки, совершенно не связанные с физиологическими симптомами заболевания.

Пример результатов дискриминантного анализа

Номер	Параметры	Вероятность правильного распознавания
1	Характер работы, 6 психологических параметров	55,55 % (1 гр.) 76,47 % (2 гр.) 67,21 % (в среднем)
2	Характер работы, наследственность, 6 психологических параметров	72,22 % (1 гр.) 73,53 % (2 гр.) 72,95 % (в среднем)
3	Характер работы, наследственность, питание, 6 психологических параметров	59,26 % (1 гр.) 75,00 % (2 гр.) 68,03 % (в среднем)
4	Характер работы, наследственность, стаж, 6 психологических параметров	70,37 % (1 гр.) 77,94 % (2 гр.) 74,59 % (в среднем)
5	Характер работы, наследственность, стаж + 5 психологических параметров (без силы нервных процессов)	70,37 % (1 гр.) 77,94 % (2 гр.) 74,59 % (в среднем)
6	Характер работы, наследственность, стаж + 5 психологических параметров (без уравновешенности)	55,55 % (1 гр.) 66,18 % (2 гр.) 61,48 % (в среднем)

Прогнозировать возникновение и развитие язвенной болезни в зависимости от характера работы, психологических, генетических и других параметров возможно с помощью дискриминантных функций  $h_k = b_{k0} + \sum_{i=1}^p b_{ki} \cdot X_i = b_{k0} + b_{k1} \cdot X_1 + b_{k2} \cdot X_2 + \dots + b_{kp} \cdot X_p$ , где  $p$  – число переменных;  $k$  – номер группы;  $X_i$  – значение  $i$ -й переменной. Коэффициенты  $b_{ki}$  рассчитываются по результатам дискриминантного анализа. Основанием отнесения случая к  $k$ -й группе является наибольшее значение функции  $h_k$ .

В качестве примера приведем значения дискриминантных функций для прогнозирования возникновения язвенной болезни. Пусть переменными являются: Стаж ( $X_1$ ), Наследственность ( $X_2$ ), Уравновешенность ( $X_3$ ), Эмоциональный стресс ( $X_4$ ), Снижение работоспособности ( $X_5$ ), Социальная адаптация Холмса ( $X_6$ ), Торонтская шкала ( $X_7$ ), Характер работы ( $X_8$ ) (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты дискриминантных функций

Переменные		Коэффициенты для группы 1	Коэффициенты для группы 2
$b_0$		-33,8266	-29,6268
Стаж	$b_1$	0,1158	0,1375
Наследственность	$b_2$	-0,1564	0,2339
Уравновешенность	$b_3$	0,3716	0,0185
Эмоциональный стресс	$b_4$	14,4811	13,9620
Снижение работоспособности	$b_5$	-0,5210	-0,8466
Социальная адаптация Холмса	$b_6$	5,5700	4,9316
Торонтская шкала	$b_7$	6,6427	6,1163
Характер работы	$b_8$	1,9593	1,4188

Аналогично могут быть получены значения дискриминантных функций для других наборов параметров.

Таким образом, предрасположенность людей к рассматриваемому заболеванию, прогнозирование ее развития можно осуществить, применяя универсальные психологические тесты. Вместе с тем в ходе решения трех рассмотренных задач выявлено, что психологические параметры оказывают различное влияние на правильную классификацию. Так, наиболее важными психологическими параметрами, связанными с тяжестью протекания язвенной болезни, оказались сила нервных процессов, уравновешенность, устойчивость к эмоциональным стрессам. Например, при прогнозировании вероятности возникновения язвенной болезни малозначительным психологическим параметром оказалась сила нервных процессов, а наиболее важной характеристикой – уравновешенность. Поэтому разработка специальных психологических тестов является весьма актуальной задачей, поскольку позволит повысить вероятность идентификации и прогноза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богер М.М. Язвенная болезнь: Современные аспекты этиологии, патогенеза, сано-генеза / М.М. Богер. Новосибирск: Наука, 1986. 256 с.
2. Статистический и нейросетевой методы идентификации и прогнозирования в медицине / Т.И. Булдакова, С.В. Колентьев, В.Б. Лифшиц и др. // Информационные технологии. 2004. № 3. С. 60-63.
3. Тюрин Ю.Н. Статистический анализ данных на компьютере / Ю.Н. Тюрин, А.А.Макаров. М.: ИНФРА-М, 1998. 528 с.

Суятинов Сергей Игоревич –  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика»  
Саратовского государственного технического университета

Ляпина Наталья Сергеевна –  
аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного  
технического университета

*Статья поступила в редакцию 07.10.10, принята к опубликованию 28.10.10*

УДК 681.5.015

**С.И. Суятинов, О.Ю. Торгашова, К.И. Кириллов, А.В. Пересунькина**

#### **ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ СОСУДИСТОЙ СТЕНКИ**

*Дано обоснование выбора структуры модели динамики стенки артерии в форме нелинейного дифференциального уравнения на основе синергетического подхода и концепции базовых моделей.*

Сердечно-сосудистая система, неинвазивные измерения, модель, уравнение Ван дер Поля, уравнение Рэлея



S.I. Suyatinov, O.Yu. Torgashova, K.I. Kirillov, A.V. Peresun'kina

## MODEL VALIDATION OF THE VASCULAR WALL DYNAMICS

*On the basis of synergy approach and of basic models conception the explanations of choice of the structure for the arterial wall model are given.*

Cardiovascular system, noninvasive measurements, model, van der Pol equation, Rayleigh equation

Функционирование сердечно-сосудистой системы человека обеспечивается взаимодействием ее многочисленных составляющих, от клеточного уровня до уровня подсистем. В настоящее время сложились два подхода к исследованию этой сложной нелинейной системы с многочисленными внутренними связями.

В случае рассмотрения системы на микроскопическом уровне детально анализируют функции каждого элемента системы. В результате получают сложные модели высокого порядка, учитывающие свойства отдельного элемента и его влияние на общую динамику. Однако есть случаи, когда система, очень сложная на микроскопическом уровне, демонстрирует довольно простое поведение на макроскопическом уровне. Макроскопический уровень отражает синергетику поведения всех элементов сложной системы и позволяет описать подсистемы сложной системы сравнительно простыми уравнениями на основе базовых моделей.

В данной работе обосновывается модель динамики стенки артерии, параметры которой могут быть определены по результатам неинвазивных измерений.

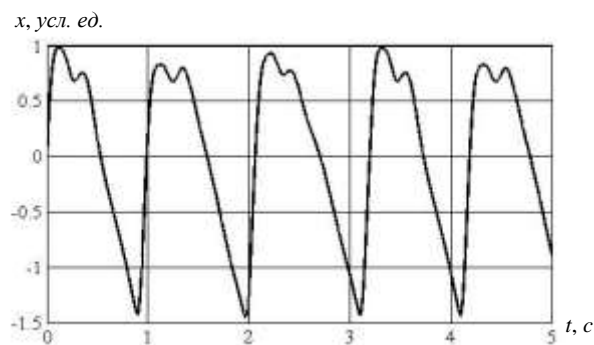
Ранее проведенные исследования биосигналов кардицикла позволили выявить следующие особенности [1]: 1) спектр биосигналов кардицикла содержит шесть характерных частот в диапазоне от 0,0095 до 2,0 Гц, обусловленные действием различных механизмов регуляции; 2) при этом колебательная активность сердца и соответствующие ей вибрации стенок сосуда находятся в диапазоне от 0,7 до 1,5 Гц; 3) размерность связанной динамической системы, генерирующей сигнал пульсовой волны, не превышает 4.

Последний экспериментальный факт с учетом представления сердечно-сосудистой системы в форме двух связанных генераторов позволяет определить порядок модели динамики стенки артерии, который получается равным 2.

Таким образом, сформулируем следующие допущения, принятые при разработке модели динамики стенки артерии. Будем рассматривать временной масштаб, обусловленный только динамикой сердца, т.е. полагаем, что наиболее информативной является полоса частот от 0,7 до 1,5 Гц.

Модель динамики стенки артерии можно представить дифференциальным уравнением 2-го порядка, причем амплитудно-частотная характеристика должна иметь спадающую форму, обусловленную инерционными свойствами стенки артерии.

Проверка адекватности полученной модели может осуществляться различными методами. Наибольшее распространение получило сравнение фазовых портретов исходной и смоделированной динамики. Однако, на наш взгляд, интегральным критерием сходства динамического поведения сравниваемых подсистем реальной и ее модели являются показатели, основанные на явлении синхронизации подобных связанных систем.



Сигнал артериальной пульсовой волны

Чем сильнее проявляются эффекты синхронизации двух связанных динамических систем, тем в большей степени похожа их внутренняя динамика, т.е. динамика, обусловленная их внутренней структурой.

Исходным для построения модели является биосигнал артериальной пульсовой волны, регистрируемый с помощью устройства регистрации поликардиосигналов [2]. Пример биосигнала представлен на рисунке.

Из рисунка видно, что движение сосудистой стенки представляет устойчивые колебания, которые могут являться предельными циклами. Известно множество уравнений, которые позволяют математически описывать такие предельные циклы. Примером подобного описания может служить представление подсистем кардиоваскулярной системы связанными осцилляторами [3].

Выберем в качестве модели динамики стенки артерии нелинейное уравнение, параметры которого в рассматриваемой задаче имеют наглядный биофизический смысл:

$$\ddot{x} + F(x)\dot{x} + ax = 0, \quad (1)$$

где  $x$  – линейное перемещение стенки сосуда;  $t$  – время;  $a = \omega_0^2$ ,  $\omega_0$  – собственная частота соответствующей линейной задачи;  $F(x)$  – некоторая (неизвестная пока) нелинейная функция.

Обоснуем выбор  $F(x)$ , на основе концепции базовых моделей. Для этого исследуем сначала уравнение Ван дер Поля, которое описывает колебательные процессы в системах различной физической природы. Имеем

$$\ddot{x} + \varepsilon(x^2 - r_0^2)\dot{x} + ax = 0, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – некоторый коэффициент пропорциональности.

Средний член уравнения (2) пропорционален скорости  $\dot{x}$  с коэффициентом  $\gamma = \varepsilon(x^2 - r_0^2)$  и определяет скорость затухания осциллятора. При  $x^2 > r_0^2$  коэффициент  $\gamma$  положителен, и колебания затухают. При  $x^2 < r_0^2$  коэффициент  $\gamma$  отрицателен, и переменная  $x$  возрастает. Следовательно, средний член  $\gamma\dot{x}$  стабилизирует движение вокруг  $x = r_0$ , иными словами, удерживает движение на предельном цикле радиуса  $r_0$ .

Найдем приближенное решение уравнения (1) и исследуем его свойства. Применение какого-либо из методов решения нелинейного дифференциального уравнения, например метода усреднения, дает следующий результат:

$$x(t) = 2r_0 \cos(\omega_0 t + \beta_0), \quad \beta_0 = const. \quad (3)$$

Вид решения (3) свидетельствует о том, что амплитуда колебаний постоянна и не зависит от частоты  $\omega_0$ . Такой вывод не вполне согласуется с естественным предположением об инерционных свойствах данной системы: с ростом частоты амплитуда колебаний падает. В связи с этим рассмотрим новое модельное уравнение – уравнение Рэлея

$$\ddot{x} + \varepsilon(\dot{x}^2 - \Omega_0^2 r_0^2)\dot{x} + ax = 0, \quad (4)$$

которое отличается от уравнения (2) видом члена, описывающего затухание. В уравнении (4) коэффициент затухания  $\gamma = \varepsilon(\dot{x}^2 - \Omega_0^2 r_0^2)$  положителен, если скорость  $\dot{x}$  больше некоторой постоянной величины  $\Omega_0 r_0$ , и отрицателен в противном случае. Таким образом, уравнение (4) стабилизирует решения с заданной скоростью.

Решение уравнения (4), найденное методом усреднения, имеет вид

$$x(t) = 2r_0 \frac{\Omega_0}{\sqrt{3}\omega_0} \cos(\omega_0 t + \beta_0), \quad (5)$$

т.е. амплитуда убывает с возрастанием частоты  $\omega_0$ .

Будем считать, что в общем случае амплитуда ведет себя как некая комбинация амплитуд выражений (3) и (5). Введем суперпозицию членов, описывающих затухание в уравнениях (2) и (4):

$$\ddot{x} + \varepsilon_1(x^2 - r_0^2)\dot{x} + \varepsilon_2(\dot{x}^2 - \Omega_0^2 r_0^2)\dot{x} + ax = 0. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) имеет вид

$$x(t) = 2r_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \Omega_0^2}{\varepsilon_1 + 3\varepsilon_2 \omega_0^2}} \cos(\omega_0 t + \beta_0). \quad (7)$$

Выражение (7) показывает, что с ростом частоты внешних возмущений, амплитуда колебаний стенки падает. Сравнение полученной амплитудно-частотной характеристики с экспериментальными данными [4] показывает хорошее качественное сходство. Адекватность модели оценивалась в соответствии с методикой, основанной на свойстве синхронизации подобных систем, приведенной в [5]. В качестве характеристики меры синхронизации выбран коэффициент корреляции между входными и выходными сигналами модели динамики стенки сосуда в системах «модель – модель» и «биообъект – модель», а также между выходами двух указанных систем. Получены следующие значения коэффициентов корреляции:  $\rho_{m-m} = 0,91$ ;  $\rho_{o-m} = 0,83$  и  $\rho_{c-c} = 0,75$ , соответственно.

Полученные результаты указывают на возможность описания динамики сосудов уравнением (7).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и CRDF в рамках программы BRNE (REC-006 SR-006-X1/BF7M06 Y5-B-06-03), а также Российского фонда фундаментальных исследований (проект №07-07-12066).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Stefanovska A. Coupled Oscillators: Complex but Not Complicated Cardiovascular and Brain Interactions / A. Stefanovska // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. November/December, 2007. PP. 25-29.
2. Пат. 2395231 РФ: МПК А61В 5/04/02, А61В 7/04, Н04R 1/46, Н04R 7/04, Н04R 17/02. Устройство регистрации поликардиосигналов / Т.И. Булдакова, А.Ю. Вакуленко, Е.С. Кузьменко, С.И. Суятинов. Оpubл. 27.07.2010. Бюл. № 21. 5 с.
3. Stefanovska A. Modelling couplings among the oscillators of the cardiovascular system / A. Stefanovska, D.G. Luchinsky, P.V.E. McClintock // Physiological measurement, No 22, PP. 551-564. 2001.
4. Морман Д. Физиология сердечно-сосудистой системы / Д. Морман, Л. Хеллер. СПб.: Питер, 2000. 256 с.
5. Akihiro Y. Characterization of biological internal dynamics by the synchronization of coupled chaotic system / Y. Akihiro, W. Hirotaka // Robotics and Autonomous Systems, 1999. V. 28. №2-3. PP. 195-206.

#### **Суятинов Сергей Игоревич –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

#### **Торгашова Ольга Юрьевна –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

#### **Кириллов Кирилл Игоревич –**

аспирант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

#### **Пересунькина Анастасия Владимировна –**

магистрант кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 05.10.10, принята к опубликованию 21.10.10*

УДК 004.89; 616.6 (007.17)

**А.А. Большаков, Д.В. Елисеев, В.Ю. Мусатов, О.В. Сидорович, С.Ю. Елизарова,  
И.В. Королева, Ю.И. Дружин, Е.Ю. Склярова**

### **КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ МОЧЕВЫВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ФОНЕ ДИСПЛАЗИИ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ТКАНЕЙ**

*Рассматривается применение методов автоматизированной диагностики заболеваний на основе анкет, включающих нечисловые признаки. Приводится методика их преобразования к квазичисловому виду. Поставлена и решена задача определения значимостей признаков и их влияния на диагнозы, что позволило оставить в анкетах наиболее значимые признаки и использовать их для автоматизированной постановки диагноза. Для решения поставленной задачи в комбинации со статистическими алгоритмами использованы нейронные сети. Для предложенных данных подобрана конфигурация сети с производительностью более 70%, что применимо для целей медицинской диагностики.*

Автоматизированная диагностика, статистическая обработка анкетных данных, нейронные сети

**A.A. Bolshakov, D.V. Eliseev, V. Yu. Musatov, O.V. Sidorovich, S.Yu. Elizarova,  
I.V. Koroleva, Yu.I. Drugin, E.Yu. Skliarova**

### **THE COMBINED METHOD OF AUTOMATED DIAGNOSTICS OF URINE REMOVE SYSTEM DISEASES ON DISPLAZION OF CONNECTING FABRICS BACKGROUND**

*In work application of methods of automated diagnostics of diseases on the basis of the questionnaires including non-numerical attributes is considered. The technique of their transformation to pseudo-numerical kind is presented. The task of importance definition of attributes and their influence on diagnoses that has allowed to leave the most significant attributes in questionnaires is put and solved and to use them for the automated statement of the diagnosis. For the decision of a task in view in a combination with statistical algorithms neural networks are used. For the offered data the configuration of a network with productivity more than 70 %, that can be applied for the purposes of medical diagnostics.*

Automated diagnostics, statistical processing of biographical particulars, neural networks

В последнее время в медицине всё шире распространяются средства автоматизированной диагностики. Как правило, их роль состоит в том, чтобы на основе предварительной информации (анкетирования, сбора анализов) максимально сузить перечень возможных заболеваний.

При обработке анкетных данных, а также некоторых видов анализа используются нечисловые признаки, которые измеряются либо в ранговой шкале, например описание болевых ощущений: слабые, умеренные, сильные; либо в номинальной, например, присутствие или отсутствие какого-либо вещества в крови.

Непосредственная обработка нечисловых данных невозможна, их требуется преобразовать к квазичисловым. Одним из таких преобразований является представление в виде единичного вектора, размерность которого соответствует вариативности признака, его элементы равны нулю, за исключением элемента, соответствующего текущему проявлению. Например, при указании асфиксии в родах возможны три варианта: лёгкая, средней степени, тяжёлая. Представив признак в виде вектора, получим:  $\alpha_1 = (1,0,0)$  – для лёгкой асфиксии;  $\alpha_2 = (0,1,0)$  – для асфиксии средней степени;  $\alpha_3 = (0,0,1)$  – для тяжёлой асфиксии.

Таким образом, можно преобразовать нечисловые переменные к векторному виду, чтобы иметь возможность проводить с ними математические операции.

При решении задач диагностики требуется решить две задачи: корректного разбиения всех наблюдений на группы по диагнозам; выделение классифицирующих функций.

Для решения первой задачи возможно применение методов структурного моделирования, таких как анализ соответствий, который предназначен для описательного и разведочного анализа многовыходовых таблиц. По своей природе он близок к факторному анализу, но позволяет исследовать структуру не только объектов, но и признаков, благодаря чему его можно использовать для уменьшения признакового пространства.

Входной информацией для анализа соответствий является таблица сопряжённости признаков (см. таблицу). Каждой строке соответствует пациент с характеризующими его признаками в столбцах.

Целью анализа является представление исходных данных в пространстве меньшей размерности с сохранением информации о различиях между строками и между столбцами. Таким образом, пациенты обладающие схожими признаками будут группироваться вместе в пространстве невысокой размерности для дальнейшей интерпретации экспертом.

Первым этапом вычисляются относительные частоты таблицы, делением каждого элемента на сумму всех элементов.

$$P = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \cdots & n_{1c} \\ n_{21} & n_{22} & \cdots & n_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{r1} & n_{r2} & \cdots & n_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1c} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{r1} & p_{r2} & \cdots & p_{rc} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Сопряжённые признаки

Объекты	Признаки				Всего по строкам
	1	2	⋮	c	
1	$n_{11}$	$n_{12}$	⋮	$n_{1c}$	$\bar{n}_1 = \sum_{j=1}^c n_{1j}$
2	$n_{21}$	$n_{22}$	⋮	$n_{2c}$	$\bar{n}_2 = \sum_{j=1}^c n_{2j}$
...	...	...	...	...	...
r	$n_{r1}$	$n_{r2}$	⋮	$n_{rc}$	$\bar{n}_r = \sum_{j=1}^c n_{rj}$
Всего по столбцам	$\bar{n}_1 = \sum_{i=1}^r n_{i1}$	$\bar{n}_2 = \sum_{i=1}^r n_{i2}$	⋮	$\bar{n}_c = \sum_{i=1}^r n_{ic}$	$\bar{n} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c n_{ij}$

где  $p_{ij} = n_{ij} / \bar{n}$ . Полученная матрица  $P$  является нормированной, так как сумма всех её элементов равна 1, и она показывает, как распределена информационная масса по ячейкам. Масса каждого столбца или строки может быть найдена суммированием по соответствующему столбцу или строке. Она показывает, какой вклад в общую конфигурацию вносит заданный тот или иной объект или признак:

$$w_{r_i} = \sum_{j=1}^c p_{ij}, w_{c_j} = \sum_{i=1}^r p_{ij}, \quad (2)$$

где  $w_{r_i}$  – масса  $i$ -го столбца,  $w_{c_j}$  – масса  $j$ -й строки.

Координаты каждого объекта или признака в пространстве более низкой размерности могут быть получены на основе сингулярного разложения:

$$D_r P D_c = D_c^{-1} 11' D_c^{-1} = U \Sigma V', \quad (3)$$

где  $D_r = \text{diag}(w_r^{1/2})$  – диагональная матрица с массами столбцов;  $D_c = \text{diag}(w_c^{1/2})$  – диагональная матрица с массами строк.

Для объектов координаты находятся по формуле

$$F = D_r U \Sigma, \quad (4)$$

а для признаков

$$G = D_c V \Sigma. \quad (5)$$

Выбор размерности пространства можно осуществить отдельно как для групп-строк, так и для категорий-столбцов. Размер базиса пространства выбирается в соответствии с величиной собственных чисел конфигурации, исходя из приемлемого процента сохранения информации.

Рассмотрим описанную методику на примере состояния дисплазии соединительных тканей (ДСТ) [1], которая подразумевает различные по степени выраженности проявления аномалии тканевой структуры, что ведет к снижению прочности соединительной ткани различных органов и систем. Клинические проявления ДСТ многообразны и носят полисистемный характер. Синдром ДСТ часто сочетается с патологией почек и мочевыводящей системы [2, 3]. Многие признаки позволяют заподозрить ДСТ на этапе физического осмотра. Однако для выявления степени ДСТ и определения ее влияния на основной диагноз необходим более детальный анализ.

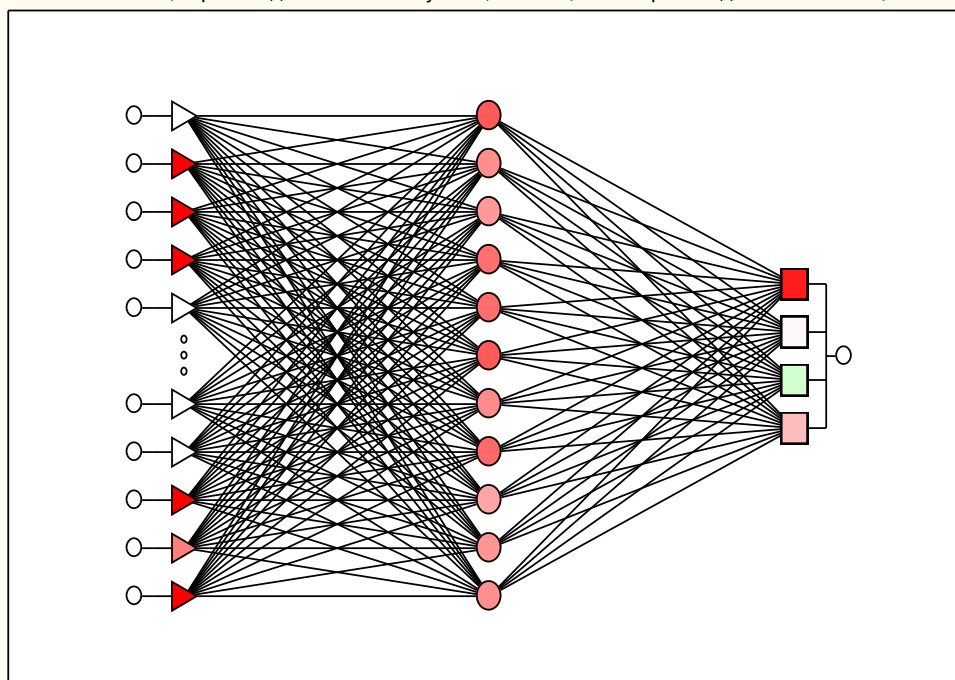
Сотрудниками Саратовского государственного медицинского университета составлена анкета опроса больных с заболеваниями мочевыводящей системы, имеющими на фоне различных диагнозов разную степень ДСТ. Эта анкета включает большое количество признаков (более 40), что затрудняет ее применение для диагностики, в том числе и автоматизированной. Кроме того, для статистических исследований такого количества признаков требуются большие, зачастую недоступные в лечебных учреждениях, массивы данных о больных.

Поставлена задача определения значимостей признаков, их влияния на диагнозы основного заболевания и степень ДСТ. Решение этой задачи позволяет оставить в анкете наиболее значимые признаки и использовать их для автоматизированной постановки диагноза основных заболеваний, сведенных в четыре группы, на фоне ДСТ различной степени (от 0 до 3).

Основную сложность анализа полученных признаков представляет их принадлежность к нечисловым шкалам, что не позволяет использовать для их анализа классические средства. Замена нечисловых значений квази-квантитативными и последующее нахождение корреляции не дали результатов, так как связи оказались незначимыми.

Для выявления зависимостей было проведено сравнение на основе таблиц сопряженности признаков по алгоритму, изложенному выше (1) – (5). Такой подход позволил выявить значимую связь между некоторыми признаками, что, в конечном итоге, позволило сократить размерность исследуемого пространства.

РБФ 24:24-11-4, Производительность обуч. = 0,734375 , Тест. производительность = 0,718750



Архитектура нейронной сети типа радиальной базисной функции

Для каждой пары связанных признаков экспертами указан более значимый, который и оставлен для последующего исследования. В результате было не только снижена размерность (с 38 до 24 признаков), но и установлена корреляция между исследуемыми величинами.

Для решения задач диагностики в комбинации с описанными статистическими алгоритмами также предлагается использование методов нейронных сетей (НС), позволяющих автоматически накапливать и затем использовать опыт при обучении [4], которые состоят из большого числа простых элементов (ячеек) обработки сигнала, каждая из которых взаимодействует с другими ячейками с помощью межсоединений. Важным аспектом в параллельной обработке информации является то, что каждая отдельная ячейка не выполняет сложные операции и основной анализ связан с работой межсоединений. Все НС состоят из: 1) набора ячеек (или нейронов по аналогии с биологическими системами); 2) схемы связей между ячейками; 3) набора правил модификации связей через обучение и последующее распространение по сети. Нейрон может иметь разное число входов и выходов, а также промежуточные («скрытые») нейронные слои. Основным принцип работы НС состоит в настройке параметров нейронов, веса и смещения, таким образом, чтобы отклик сети соответствовал заданному. Часто НС корректирует параметры для достижения требуемого результата. Для реализации с помощью математического пакета Statistica использован алгоритм радиальной базисной функции (РБФ) с количеством входов, равным числу признаков, 4 выходами (по числу определяемых диагнозов) и различным количеством внутренних слоев и нейронов в них. Проведенный анализ показывает, что при использовании исходной анкеты со 150 записями о больных и имеющей 38 различных признаков, производительность различных вариантов НС, т.е. количество правильно распознанных диагнозов (от 1 до 4) не превышает 41%. После уменьшения количества признаков до 24 удалось построить РБФ с 24 входными нейронами, двумя скрытыми слоями с 24 и 11 нейронами соответственно и 4 выходными нейронами (см. рисунок), с производительностью более 70%, что применимо для целей медицинской диагностики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шабалина И.М. Разработка математической модели и компьютерная реализация процедур диагностики дисплазии соединительных тканей / И.М. Шабалина, В.Л. Абакумов, Л.Н. Фомина // Труды Петрозаводского государственного университета. 1998. Вып. 7. С. 103-119.
2. Игнатова О.А. Признаки дисплазии соединительной ткани у детей с дисметаболическими нефропатиями / О.А. Игнатова, Л.И. Меньшикова, В.И. Макарова // Детское здравоохранение России : Стратегия развития. М., 2001. С. 237-238.
3. Хрущева Н.А. Нейрогенные дисфункции мочевого пузыря у детей с синдромом соединительнотканной дисплазии / Н.А. Хрущева, В.А. Серебренников, Г.А. Козлова и др. // Детское здравоохранение России : Стратегия развития. М., 2001. С.617.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский: пер. с пол. И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика. 2004. 344 с.

### **Большаков Александр Афанасьевич –**

доктор технических наук, декан факультета электронной техники и приборостроения, заведующий кафедрой «Системотехника», профессор кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

### **Елисеев Дмитрий Владимирович –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета

### **Мусатов Вячеслав Юрьевич –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

### **Дружин Юрий Иванович –**

студент Саратовского государственного технического университета

### **Склярова Екатерина Юрьевна –**

студентка Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 12.10.10, принята к опубликованию 26.10.10*

УДК 617-089

**Т.А. Митрофанова, В.В. Вуйко, Р.А. Здражевский, С.Н. Потахин**

## **АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЗАДАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ МАЛОИНВАЗИВНЫХ ХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ**

*Разработан макет устройства, моделирующего работу датчика и хирургического инструмента с применением микромеханических акселерометров и лазерных указок для контроля точности направления их осей.*

Пространственное положение инструментов, микромеханические акселерометры



T.A. Mitrofanova, V.V.Vuyko, R.A. Zdragevskij, S.N. Potahin

## HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR THE TASK OF SPATIAL POSITION OF TOOLS AT SURGICAL OPERATIONS

*The breadboard model of the device modelling work of the gauge and the surgical instru-cop with application micromechanical accelerometer and laser pointers for control of accuracy of a direction of their axes is developed.*

### Spatial position of tools, micromechanical accelerometer

В последние годы отмечается значительное увеличение доли малоинвазивных вмешательств среди хирургических операций. «Минидоступ» и эндоскопическая техника используются сегодня в абдоминальной и торакальной хирургии, онкологии, ортопедии, ангиохирургии и даже нейрохирургии. Основное достоинство этих операций и смысл технологии в уменьшении травматизма операции, а не ее объема. Нередко хирургический доступ является более травматичным, чем вмешательство на органе. Кроме того, при малоинвазивных вмешательствах практически исключаются осложнения со стороны раны (нагноение, эвентрация, образование грыж), а также образование спаек в брюшной или иной полости. Что касается объема вмешательства, то современная техника позволяет выполнить почти все, что раньше было возможно только при «открытых» операциях.

Общей особенностью малоинвазивной абдоминальной хирургии и хирургических вмешательств в проктологии, гинекологии и оториноларингологии является ограниченный размер хирургического доступа. Доступы при этих операциях представляют своего рода «замочную скважину», через которую необходимо осмотреть большой объем внутреннего пространства пациента. Размер доступа ограничивает угол обзора для хирурга в глубине раны, что заставляет использовать или эндоскопические инструменты или специальные зеркала и ретракторы.

Учитывая современные тенденции развития медицинской техники, целесообразно использовать датчики пространственного положения хирургических инструментов. Разработка и внедрение в практику подобных устройств и программного обеспечения для определения положения инструментов и траектории их движения позволит оптимизировать выполнение малоинвазивных хирургических вмешательств. Датчики могут располагаться на рукоятках инструментах, эндоскопических портах, поверхности тела пациента.

Подобные устройства могут использоваться в ортопедии и травматологии при проведении «вслепую» различных металлоконструкций (спиц, стержней, штифтов и т.д.). Предварительный расчет траектории движения инструмента позволит избежать повторных корректировок его положения после рентгенологического контроля, что, в свою очередь, уменьшит длительность и инвазивность вмешательств.

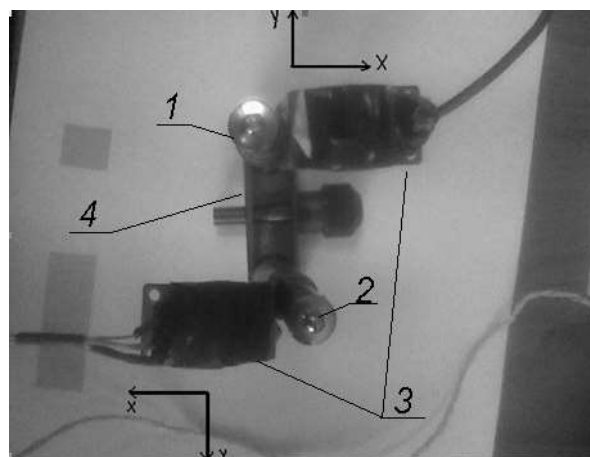


Рис. 1. Соответствие осей акселерометра:  
1 – макет датчика УЗИ с лазерной указкой;  
2 – макет хирургического инструмента с лазерной указкой; 3 – акселерометры ADXL 203;  
4 – основа с шаровым механизмом

Технические характеристики акселерометра

Диапазон измеряемых углов, угл. град.	±90
Оси чувствительности	X,Y
Разрешение, угл. град.	0.2
Нелинейность, % от полной шкалы	0.2
Поперечная чувствительность, %	2
Температурный дрейф нуля, угл. град./°C	0.12
Плотность шумов, угл. град./√Гц	0.3·10 <sup>-4</sup>

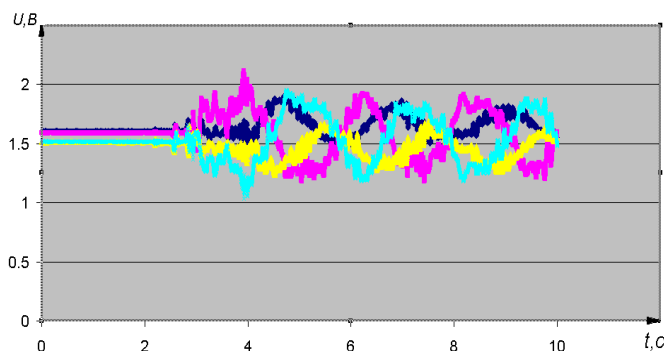


Рис. 2. Пример записи сигналов

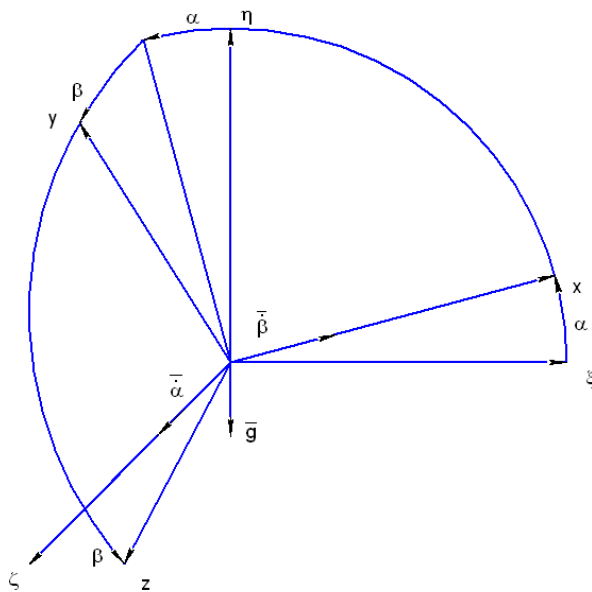


Рис. 3. Схема углов разворотов акселерометра

КПА-5 с диапазоном углов наклона ±45°. Измерение датчиков вводилось в ПК при помощи 16-битного 8-канального конвертера «В-480».

Пример записи сигналов акселерометра по направлению X приведен на рис. 2.

Схема разворотов акселерометра при наклоне платформы приведена на рис. 3, матрица направляющих косинусов имеет вид

$$[XYZ]^T = N * [\xi\eta\zeta]^T,$$

Применение устройства также возможно для диагностики гиперкинезов у неврологических больных.

Разработан макет устройства, моделирующего работу датчика и хирургического инструмента, в котором применены микромеханические акселерометры марки ADXL203 и лазерные указки для контроля точности направления их осей. Внешний вид прибора и направления осей чувствительности акселерометров изображены на рис. 1.

К макетам датчиков прикреплены лазерные указки, свет от которых проецируется на объект. К каждой указке прикреплен акселерометр, регистрирующий положение инструмента и датчиков.

Примененные в макете акселерометры ADXL203 – это малопотребляющий двухосный акселерометр с пределами измерения ±2g, выдающий аналоговый сигнал, пропорциональный ускорению вдоль каждой оси чувствительности [2].

Питание акселерометра производится от стабилизированного источника питания с выходным напряжением 3,3 вольта.

Основные технические параметры акселерометра приведены в таблице.

Калибровка выходных сигналов производилась на поворотном столе

$$N = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha \cdot \cos \rho & \cos \alpha \cos \rho & \sin \beta \\ \sin \alpha \cdot \sin \rho & -\cos \alpha \cdot \sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix}; \begin{cases} W_x = W_\xi \cos \alpha + W_\eta \sin \alpha \\ W_y = -W_\xi \sin \alpha \cos \rho + W_\eta \cos \alpha \cos \rho + W_\zeta \sin \beta \\ W_z = W_\xi \sin \alpha \cos \rho - W_\eta \cos \alpha \sin \rho + W_\zeta \cos \beta \end{cases};$$

Выражения для вычисления углов наклонов хирургического инструмента и датчика по отношению к вертикали имеют вид

$$\alpha = -\arcsin \frac{k_{xi} \cdot u_{xi}}{g}; \beta = \arccos \frac{k_{yi} \cdot u_{yi}}{g \cos \alpha};$$

где  $k_{xi}, k_{yi}$  – масштабные коэффициенты акселерометра;  $u_{xi}, u_{yi}$  – выходные системы.

Алгоритмы обработки предусматривают начальную выставку датчика и инструмента в области проведения операций и визуализацию согласования направления датчика и инструмента с помощью средств двумерной графики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нуднов Н.В. Диагностические и лечебные пункции под контролем лучевых методов визуализации / Н.В. Нуднов. Визуализация в клинике. 1995. Пилот. Вып. 28-41.
2. <http://www.analog.com>

**Митрофанова Татьяна Александровна** – студентка Саратовского государственного технического университета

**Вуйко Владимир Вячеславович** – студент Саратовского государственного технического университета

**Здражевский Роман Анатольевич** – ассистент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета

**Потахин Сергей Николаевич** – кандидат медицинских наук, доцент кафедры «Общая хирургия» Саратовского государственного медицинского университета

*Статья поступила в редакцию 06.10.10, принята к опубликованию 18.10.10*

УДК 004.942

**М.О. Оболонский, М.Б. Бровкова**

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ УСТРАНЕНИЯ УГРОЗЫ БЕЗОПАСНОСТИ

*Рассмотрен подход к определению вероятности устранения угрозы безопасности с учетом количественных и качественных требований. Предложен пример используемой методики для вычисления вероятности устранения угрозы утечки информации по акустическому каналу.*

Угроза безопасности, метод анализа иерархий

M.O. Obolonsky, M.B. Brovkova

## TECHNIQUE OF DEFINITION OF PROBABILITY OF ELIMINATION OF THREAT OF SAFETY

*The approach of calculation of probability of elimination of threat of safety taking into account quantitative and qualitative requirements is considered. The example of a used technique for calculation of probability of elimination of threat of information leakage on the acoustic channel is offered.*

Threat of safety, the method of analysis of hierarchies

Безопасность информации должна быть обеспечена при комплексном использовании арсенала имеющихся средств защиты в структурных элементах производственной системы и на всех этапах технологического цикла обработки информации. Наибольший эффект достигается тогда, когда используемые средства, методы и меры объединяются в единый целостный механизм – систему защиты информации (СЗИ). Наличие СЗИ обуславливает необходимость для полной или частичной компенсации угроз безопасности. Основной характеристикой СЗИ является вероятность устранения каждой актуальной угрозы. Для определения этой вероятности необходимо прибегнуть к моделированию угрозы, т.к. именно оно позволяет достаточно полно исследовать способы и средства защиты.

Предположим, что вероятность устранения угрозы безопасности определяется тем, насколько полно учтены требования к системе защиты информации, то есть представить в виде функциональной зависимости:  $P_{yemp} = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$  [1], где  $x_m$  – степень выполнения требования  $m$  для устранения угрозы. Требования могут выдвигаться различные по содержанию, но их можно разделить на два класса: количественные и качественные. К примеру, к количественным требованиям можно отнести требования, характеристики которых можно выразить в числовых значениях: толщина, длина, высота, геометрические и физические величины и т.д. Это могут быть номинальные и относительные значения, предельные отклонения и допуски. К качественным характеристикам можно отнести такие понятия как: устойчивость, прочность, надежность и т.д.

Степень выполнения количественного требования определяется его близостью к требуемому значению. Для оценки степени выполнения количественного требования удобнее использовать его нормированное значение  $x_i (j=1, k) 0 \leq x_i \leq 1$ . Для нормировки будем использовать функцию вида:  $\bar{x}_i = (x_i - x_i^{hx}) / (x_i^{nl} - x_i^{hx})$ , где  $x_i$  – текущее значение  $i$ -го требования,  $x_i^{nl}$  и  $x_i^{hx}$  – наилучшее и наихудшее значение  $x_i$ . В итоге получаем следующие значения:

$$1) \text{ при } x_i^{nl} = x_i^{\max}; x_i^{hx} = x_i^{\min} \text{ получаем: } \bar{x}_i = (x_i - x_i^{\min}) / (x_i^{\max} - x_i^{\min});$$

$$2) \text{ при } x_i^{nl} = x_i^{\min}; x_i^{hx} = x_i^{\max} \text{ получаем: } \bar{x}_i = (x_i^{\max} - x_i) / (x_i^{\max} - x_i^{\min});$$

$$\text{Таким образом, } \bar{x}_i = \begin{cases} 0, & x_i > x_i^{\min}; x_i < x_i^{\max}; \\ 1, & x_i = x_{opt}; \\ (x_i - x_i^{\min}) / (x_i^{opt} - x_i^{\min}), & x_i^{\min} \leq x_i \leq x_{opt}; \\ (x_i^{\max} - x_i) / (x_i^{\max} - x_i^{opt}), & x_i^{opt} \leq x_i \leq x_i^{\max}. \end{cases}$$

Степень выполнения  $i$ -го качественного требования определяется функцией принадлежности к наилучшему значению  $\mu(x_i)$ . Функция принадлежности  $\mu^T(x_i)$  определяет субъективную меру (в диапазоне  $[0;1]$ ) уверенности эксперта в том, что значение  $x$  соответствует нечеткому терму  $T$ . Для построения функции принадлежности чисел, которые приблизительно равны некоторому  $K$ , можно использовать функцию:  $\mu_K(x) = e^{-\alpha(k-x)^2}$ , где  $\alpha$  – определяется

из выражения  $\alpha = -4\ln(0,5)/\beta^2$ ;  $\beta$  – расстояние между точками перехода ( $a$  и  $b$ ), в которых функция приобретает значение 0,5.

Для удобства представления функции ее целесообразно разложить в ряд Макларена в связи с тем, что первый член суммы относительно легко найти, так как  $P_{ycmp}(0) = P_{ycmp}(x_1 = 0, \dots, x_m = 0) = 0$  и показывает вероятность устранения угрозы при невыполнении всех требований. Очевидно, что эта вероятность будет равна 0, потому что не учтено ни одно из требований. Разложим функцию  $P_{ycmp}(x_1 \dots x_m)$ , ограничившись только первыми членами ряда:

$$P_{ycmp} = P_{ycmp}(0) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial P_{ycmp}}{\partial x_i} \cdot x_i. \quad (1)$$

Исходя из физического смысла частной производной,  $\partial P_{ycmp} / \partial x_i$  показывает насколько быстро функция вероятности изменяется при движении вдоль направления  $x_i$ , т.е., можно сказать, насколько компонента  $x_i$  влияет на окончательное значение вероятности. Тем самым,  $\partial P_{ycmp} / \partial x_i$  – определяет важность выполнения требования  $x_i$  для устранения угрозы. Обозначим  $\partial P_{ycmp} / \partial x_i = \omega_i$  – важность выполнения  $i$ -го требования для устранения угрозы.

Возникает задача определения важности (веса) требований для устранения угрозы. Наиболее наглядным является метод попарного сравнения [2] (метод Саати). Метод заключается в том, что результаты попарного сравнения записываются матрицей с учетом следующей шкалы относительной важности: 1) равная важность сравниваемых требований; 3) умеренное (слабое) превосходство одного над другим; 5) сильное превосходство; 7) очевидное; 9) абсолютное; 2, 4, 6, 8) промежуточные решения.

Таким образом,  $A = \|\lambda_i / \lambda_j\|; i, j = 1, n$ . Справедливо следующее равенство:  $(A - nE)\varpi = 0$ , где  $E$  – единичная матрица,  $\varpi$  – вектор весов. Для решения задачи необходимо найти вектор весов. Поскольку ранг матрицы равен  $1, n$  – единственное собственное число матрицы. Эта неоднородная система имеет решение тогда и только тогда, когда определитель матрицы  $A - nE$  равен 0. Вычисление весовых коэффициентов с помощью определения вектора  $\varpi$  матрицы попарных сравнений является трудоемкой задачей. Для решения практических задач предлагают определять весовые коэффициенты вычислением среднего геометрического из соотношения:

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad (2)$$

где  $a_{ij}$  – коэффициенты матрицы попарных сравнений. Формулу для нахождения  $P_{ycmp}(x_1 \dots x_m)$  можно переписать в следующем виде, заменив частные производные компонентами вектора нормировки:  $P_{ycmp}(x_1 \dots x_m) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot x_i$ . Так как требования делятся на количественные и качественные, предположим, что количественных требований  $k$ , тогда остальные требования  $m-k$  – качественные. В связи с этим формула определения вероятности примет вид

$$P_{ycmp}(x_1 \dots x_m) = \sum_{i=1}^k \omega_i \cdot \bar{x}_i + \sum_{i=k+1}^m \omega_i \cdot \mu(x_i). \quad (3)$$

Приведем пример использования разработанной методики, для этого рассмотрим упрощенную СЗИ, в которой существует только один технический канал утечки информации – акустический [2]. Информация, подлежащая защите, может содержаться непосредственно в произносимой речи, в наличии функций голосового ввода или функций воспроизведения информации акустическими средствами.

Возможные признаки, по которым может происходить утечка акустического сигнала: 1) малая толщина стен (плохая звукоизоляция); 2) малая толщина дверей помещения (плохая звукоизоляция); 2) отсутствие экранов на отопительных системах; 3) близость окон к улице и другим домам; 4) появление рядом с помещением людей с большими сумками, зонтиками и т.д., частая и продолжительная парковка автомобилей рядом с организацией (могут быть использованы направленные и ненаправленные микрофоны).

Приведенные признаки являются лишь ориентирами. В конкретных ситуациях состав их может существенно меняться.

### Нормы звукоизоляции стен

Нормы звукоизоляции стен помещений можно определить исходя из СНиП: 1) 54 дБ для домов категории А (высококомфортные условия); 2) 52 дБ для домов категории Б (комфортные условия); 3) 50 дБ для домов категории В (предельно допустимые условия).

### Нормы звукоизоляции дверей

В соответствии со стандартом СНиП показатели звукоизоляционной двери должны быть на уровне задерживания, как минимум 26 децибел (дБ). Стены с дверью между квартирой и лестничной клеткой; 1) 35 в домах категории А; 2) 32 в домах категории В; 3) 30 в домах категории С.

Максимальная звукоизоляция дверей – 45 дБ.

### Экраны на отопительных системах

Это качественная характеристика. Для простоты определим, что если экраны на отопительных системах: отсутствуют, то значение функции принадлежности -1, частично присутствуют – 0,5, присутствуют на всех – 1.

### Близость окон к улице и другим домам

Также является качественной характеристикой. Заметим, что достаточным расстоянием близости к улице и другим домам является 7 м. Следовательно, необходимо построить функцию принадлежности числу 7, для чего необходимо определить параметры  $a$  и  $b$ .

Параметр  $\beta$  определяется по специальному эвристическому алгоритму (указать статью, в которой это происходит). В нашем случае  $\beta = 3,22$ , тогда  $\alpha = 0,267$ . Следовательно, функция принадлежности имеет вид:  $\mu_7(x) = e^{-0,267(7-x)^2}$ .

### Обеспечение контролируемой зоны

Появление рядом с помещением людей с большими сумками, зонтами и т.д., частая и продолжительная парковка автомобилей рядом с организацией – возможно применение направленных и ненаправленных микрофонов. Здесь дальность перехвата может достигать до 200 метров. В этом пункте можно говорить об обеспечении наличия контролируемой зоны, в которой запрещено неконтролируемое пребывание лиц и ТС, не имеющих разового или постоянного допуска. Здесь также необходимо построить функцию принадлежности – примерно числу 202 м (эвристические методы лучше работают для чисел не кратных 10). Тогда  $\beta = 0,92$  и  $\alpha = 3,276$ , следовательно функция принадлежности будет иметь вид:  $\mu_{202}(x) = e^{-3,276(202-x)^2}$ .

Теперь пусть в результате экспертного опроса матрица попарных сравнений требований (с учетом шкалы важности) будет иметь вид

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 6 & 3 & 8 & 4 \\ 1/6 & 1 & 5 & 2 & 6 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 4 & 3 \\ 1/8 & 1/2 & 1/4 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/6 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{vmatrix}.$$

Тогда по формуле (2) найдем вектор весов  $\omega$ :

$$\omega_1 = \sqrt[5]{\prod_{j=1}^5 a_{1j}} = \sqrt[5]{1 \cdot 1/6 \cdot 1/3 \cdot 1/8 \cdot 1/4} \approx 0,28, \quad \omega_2 = \sqrt[5]{\prod_{j=1}^5 a_{2j}} = \sqrt[5]{6 \cdot 1/5 \cdot 1/5 \cdot 1/6 \cdot 1} \approx 0,525,$$

$$\omega_3 = \sqrt[5]{\prod_{j=1}^5 a_{3j}} = \sqrt[5]{3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 1 / 4 \cdot 1 / 3} \approx 1,046, \quad \omega_4 = \sqrt[5]{\prod_{j=1}^5 a_{4j}} = \sqrt[5]{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 1 / 3} \approx 1,844, \quad \omega_5 = \sqrt[5]{\prod_{j=1}^5 a_{5j}} = \sqrt[5]{4 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 1} \approx 2,93.$$

Для того, чтобы каждый коэффициент был меньше 1, необходимо весовой коэффициент нормировать на их сумму по всем факторам:  $\bar{\omega}_i = \omega_i / \sum_{i=1}^n \omega_i$ . Следовательно, получим вектор нормировки:  $[\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \bar{\omega}_3, \bar{\omega}_4, \bar{\omega}_5] = [0,042; 0,079; 0,158; 0,278; 0,442]$  – таким образом, важность выполнения требований определена.

Введем исходные значения для рассматриваемой угрозы, которые могут быть вычислены или определены сотрудниками подразделения обеспечения безопасности:

1. Пусть текущая (измеренная) звукоизоляция стен составляет  $x = 51,5$  дБ. Тогда  $x^{\min} = 50$  дБ – минимально допустимое значение,  $x^{\max} = 54$  дБ – высококомфортные условия,  $x^{\text{opt}} = 52$  дБ – комфортные условия. Так как  $x^{\min} \leq x \leq x^{\text{opt}}$ , то  $\bar{x} = (x - x^{\min}) / (x^{\text{opt}} - x^{\min}) = (51,5 - 50) / (52 - 50) = 0,75$ .

2. Пусть текущая (измеренная) звукоизоляция дверей составляет  $x = 30$  дБ. Тогда  $x^{\min} = 26$  дБ – минимально допустимое значение,  $x^{\max} = 45$  дБ – высококомфортные условия,  $x^{\text{opt}} = 32$  дБ – комфортные условия. Так как  $x^{\min} \leq x \leq x^{\text{opt}}$ , то  $\bar{x} = (x - x^{\min}) / (x^{\text{opt}} - x^{\min}) = (30 - 26) / (32 - 26) = 2/3$ .

3. Пусть экраны на отопительных системах установлены частично, то есть  $\mu(x) = 0,5$ .

4. Пусть наиболее близкое окно противоположного здания находится на расстоянии 6 метров, значит, подставляя это значение в функцию принадлежности  $\mu_7(x) = e^{-0,267(7-x)^2}$ , получим  $\mu_7(6) = e^{-0,267(7-6)^2} = 0,766$ .

5. Пусть размер контролируемой зоны, которую может обеспечить служба безопасности, составляет 170 метров. Тогда  $\mu_{202}(170) = e^{-3,276(202-170)^2} \rightarrow 0$ , следовательно, положим  $\mu_{202}(170) = 0$ .

Подставим полученные значения в формулу нахождения вероятности устранения угрозы:  $P_{\text{устр}}(x_1 \dots x_m) = \sum_{i=1}^k \omega_i \cdot \bar{x}_i + \sum_{i=k+1}^m \omega_i \cdot \mu(x_i) = 0,042 \cdot 0,75 + 2 \cdot 0,079/3 + 0,278 \cdot 0,5 + 0,442 \cdot 0 = 0,22$ .

Таким образом, рассмотрен пример использования разработанной методики для определения вероятности устранения угрозы утечки акустической информации при конкретных существующих условиях. В зависимости от этих условий вероятность устранения угрозы можно повысить, в чем и будет заключаться деятельность специалистов по защите информации.

Данная методика может послужить в дальнейшем основой для расчета относительного ущерба, наносимого угрозами безопасности, с целью обоснования затрат на СЗИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Домарев В.В. Безопасность информационных технологий. Методология создания систем защиты / В.В. Домарев. К.: ООО «ТИД ДС», 2002. 688 с.
2. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати. М.: Радио и связь, 1989. 316 с.

### **Бровкова Марина Борисовна –**

доктор технических наук, профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

### **Оболонский Максим Олегович –**

аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 01.10.10, принята к опубликованию 21.10.10*

УДК 004.932.72

**А.А. Большаков, Н.С. Булдаков**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИННЫХ ПОЛЕЙ**

*Предложен алгоритм обработки изображений минных полей по космическим снимкам. Алгоритм использует клеточные автоматы для низкочастотной фильтрации, контрастирования, сегментирования изображений и нормализации полученных кластеров. Применение клеточных автоматов позволяет повысить надежность распознавания образов мин.*

Космическое зондирование, минные поля, обработка изображений, клеточные автоматы

**A.A. Bolshakov, N.S. Buldakov**

## **CELLULAR AUTOMATIC MACHINES FOR PROCESSING OF IMAGES OF MINEFIELDS**

*The algorithm for image processing of minefields on space pictures is offered. The algorithm uses cellular automatic machines for a low-frequency filtration, contrasting, segmentations of the images and normalization received cluster. Application of cellular automata can increase the reliability of mines pattern recognition.*

Space sounding, minefields, image processing, cellular automatic machines

Одной из жизненно важных задач является идентификация минных полей по результатам космического зондирования поверхности земли в различных диапазонах длин волн [1]. При этом фотосъемка может вестись с различных носителей: космический аппарат, самолет, дистанционно пилотируемый летательный аппарат. Однако, несмотря на различные методы получения изображений минных полей, основные этапы обработки снимка остаются традиционными и включают оцифровку изображения исследуемого участка местности и ввод его в ЭВМ; предварительную обработку с целью выделения малоразмерных объектов одинаковой природы (предположительно мин), формирование бинарного изображения; распознавание мин и минных полей на исследуемом участке местности.

Особенностью рассматриваемой задачи является то, что необходимо выделить малоразмерные объекты, изображения которых зависят от типа мин, способов их установки, условий наблюдения и типа регистрирующих датчиков. Кроме того, в пределах одного снимка объекты могут находиться на различных подстилающих поверхностях, имеющих существенно разную яркость (рис. 1).

В общем представлении обработка снимков сводится к различным манипуляциям с характеристиками пикселей – элементарных элементов изображения. Изменяя эти характеристики, или состояние пикселей, выделяем определенные свойства исходного изображения.



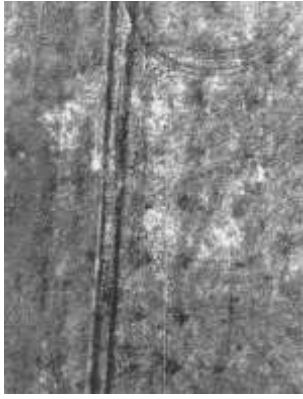


Рис. 1. Снимок из космоса минного поля

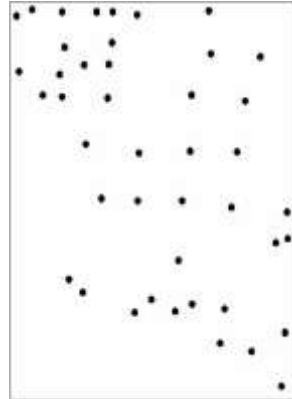


Рис. 2. Нормализованные по размеру элементы изображения

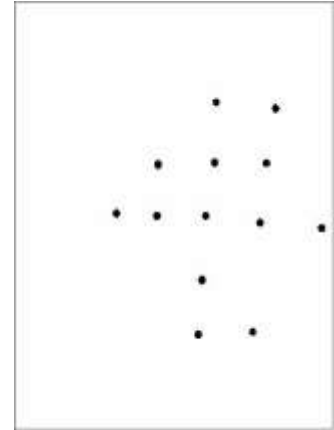


Рис. 3. Идентифицированное минное поле

Математически цифровая форма изображения имеет вид матрицы  $N \times M$ , каждый элемент которой характеризуется величиной яркости  $S_{x_i y_j}$  и координатами  $x_i$  и  $y_j$  ( $i = 1, N$ ;  $j = 1, M$ ). Предполагается, что с учетом масштаба изображения, средний диаметр изображения мины занимает 12 пикселей. Следует отметить, что этот диаметр включает размер самой мины и измененный вокруг нее подстилающий слой.

В настоящее время существуют различные методики разработки алгоритмов обработки изображений. Однако наиболее перспективным представляется подход, реализующий концепцию клеточных автоматов [2]. Эта концепция с учетом дальнейшего развития нейронных клеточных автоматов (КА), придает алгоритму обработки элементы искусственного интеллекта и позволит в будущем повысить надежность распознавания.

При использовании КА для обработки изображений устанавливается взаимно-однозначное соответствие между пикселями изображения и процессорными элементами клеточного автомата. Поэтому размеры массива элементов изображения и массива процессоров равны. Состояние каждого клеточного автомата в решетке определяется тремя дискретными наборами данных и двумя функциями. Три набора данных включают: {входы}, {внутреннее состояние} и {выходы}. Функция изменения состояния отображает вход и переход состояния в момент времени  $t$  в новое состояние в момент времени  $t + \Delta t$ . Функция выхода  $F$  преобразует вход и состояние в момент времени  $t$  в новое значение выхода в момент времени  $t + \Delta t$ . Если состояние является выходным сигналом, то обе эти функции одинаковы. Функционирование клеточного автомата включает три шага: определение состояния соседей и внутреннего состояния, использование этой информации как входной к внутреннему набору правил (или программ) и выполнение некоторого действия.

Эволюция КА осуществляется отдельными шагами. Работу КА на каждом шаге можно трактовать как выполнение операции преобразования  $F$  входного образа  $G^t$  в выходной образ  $Q^{t+1}$ . Математически это запишем так:  $F: G \rightarrow Q$ ,  $Q_{xy}^{t+1} = F(G_{xy}^t)$ ,  $G_{xy}^t = \{S_{pq}^t; (p, q) \in N_{xy}\}$ , где  $S_{pq}^t$  – значение элемента изображения с координатами  $p, q$  в окрестности  $N_{xy}$  в момент времени  $t$ ;  $F$  – функция выхода.

В общем случае окрестность  $N_{xy}$  представляется прямоугольником, который математически описывается выражением

$$N_{xy}^{KL} = \{(p, q); \quad x - L1 \leq p \leq x + L2; \quad y - K1 \leq q \leq y + K2\}$$

Разработка алгоритма обработки изображения на базе КА заключается в построении функций  $F$  и определении порядка их применения.

Предварительный анализ аэрокосмического снимка минного поля показывает, что имеется много мелких разбросанных случайным образом элементов изображения, которые создают помехи для идентификации мин. Дополнительные сложности создает то обстоятельство, что яркости этих элементов существенно отличаются друг от друга. Поэтому, прежде чем сегментировать изображение, основываясь на яркости точек, необходимо получить сглаженную версию с более однородной внутренней структурой, причем желательно, чтобы размеры большинства элементов изображения были не меньше фактических размеров мин. Следовательно, необходимо провести операцию «размытия яркости» или низкочастотную фильтрацию изображения.

Несмотря на большое разнообразие низкочастотных фильтров, используемых при обработке изображений, невозможно указать оптимальный для решения конкретной задачи. В данной работе исследованы следующие фильтры с разными значениями параметров:

1) низкочастотный фильтр Гаусса:

$$Q_{xy}^{t+1} = \frac{\sum_{k=-L1}^{L2} \sum_{m=-K1}^{K2} S^t(x-k, y-m) e^{-\frac{k^2+m^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{k=-10}^{10} \sum_{m=-10}^{10} e^{-\frac{k^2+m^2}{2\sigma^2}}}, \text{ где } L1, L2, K1, K2 \text{ и } \sigma - \text{параметры фильтра};$$

2) равномерно сглаживающий фильтр:

$$Q_{xy}^{t+1} = \sum_{p=x-L1}^{x+L2} \sum_{q=y-K1}^{y+K2} \frac{1}{L * K} \cdot S_{pq}^t, \text{ где } L = L1+L2+1 \text{ и } K = K1+K2+1;$$

3) низкочастотный фильтр, ослабления которого задаются с помощью матрицы

$$F = \begin{pmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0.0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.6 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0.2 & 0.4 & 0.6 & 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.6 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0.0 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \end{pmatrix},$$

а выход вычисляется в соответствии с выражением  $Q_{xy}^{t+1} = \frac{\sum_{i=-3}^3 \sum_{j=-3}^3 (S^t(x+i, y+j) \cdot F(i+4, j+4))}{40}$ , для всех  $x \in [1; N]$  и  $y \in [1; M]$ .

Лучшие результаты показал низкочастотный фильтр Гаусса при следующих параметрах:  $L1 = L2 = K1 = K2 = 15$  и  $\sigma = 5$ . Выбор этих параметров сделан с учетом размеров обнаруживаемых объектов. Низкочастотная фильтрация позволила устранить мелкие помехи. Однако и контуры искомым объектов стали менее заметны. Поэтому следующая операция заключается в контрастировании изображения.

Традиционно контрастирование выполняется с помощью дифференциальных фильтров, работа которых основана на локальной разности яркостей. В данном случае они малоэффективны из-за отмеченных выше особенностей. Их применение приводит к чрезмерной детализации изображения, которая разрушает искомые объекты. Поэтому апробированы алгоритм линейного повышения контраста и алгоритм интегрального контрастирования. В окончательном варианте выбран интегрального контрастирования, который реализован дважды.

Яркость пикселя при использовании алгоритма интегрального контрастирования определялась по формуле  $Q_{xy}^{t+1} = S_{xy}^t + (S_{xy}^t - \frac{1}{N * M} \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^M S_{pq}^t)$ . Из-за большой зависимости яркости интересующих объектов от их положения на снимке, проведена нормализация, или контрастирование исходного изображения добавлением локального контраста:

$$Q_{xy}^{t+1} = S_{xy}^t + (S_{xy}^t - \frac{1}{(L1 + L2 + 1) * (K1 + K2 + 1)} \sum_{p=x-L1}^{x+L2} \sum_{q=y-K1}^{y+K2} S_{pq}^t)$$

Лучшие результаты получены при следующих значениях параметров:  $L1 = L2 = K1 = K2 = 10$ . Следует отметить, что нормализация выполнена дважды.

Получение бинарной формы изображения является весьма ответственной задачей, т.к. позволяет выделить нужную информацию, устранив излишнюю. Ошибки в этом алгоритме могут привести к совершенно противоположному результату. В работе созданы и исследованы два алгоритма:

1) пороговое отсечение изображения по яркости и доведение изображения  $S_{xy}^t$  до бинарного:

$$Q_{xy}^{t+1} = \begin{cases} 255.0, & \left( \frac{\sum_{i=-\frac{s_x}{2}}^{\frac{s_x}{2}} \sum_{j=-\frac{s_y}{2}}^{\frac{s_y}{2}} S'(x+i, y+j)}{(s_x+1) \cdot (s_y+1)} \right) \geq (1.0 + 30.0 \cdot P), \\ 0.0 & \end{cases}$$

где  $s_x = 6.0$ ,  $s_y = 6.0$ , а величина, регулирующая чувствительность алгоритма  $P[0.0; 1.0]$ , регулируется при настройке;

2) алгоритм стягивания с последующим компарированием.

Этот алгоритм реализуется на трех последовательных шагах. На первом шаге осуществляется операция стягивания. Обычно эта стандартная операция выполняется над бинарными образами. В нашем случае эта операция используется особым образом. Вначале вычисляется коэффициент охвата точки  $R_{xy}$  с координатами  $(x, y)$ . Здесь  $R_{xy} = \text{Int} \left( \frac{1}{S_{xy}^t} \sum_{p=x-1}^{x+1} \sum_{q=y-1}^{y+1} \cdot S'_{pq} \right)$  является целым числом и отношением суммарной яркости пикселей, окружающих данную точку, к яркости самой точки. В алгоритме установлено правило: если  $R_{xy} \geq 6$ , то  $S_{xy}^t$  принимает значение яркости равное 255.

Эта процедура позволила стянуть объекты, уменьшив разброс в яркости. Однако при этом возникли высокочастотные помехи. Поэтому на следующем шаге использовано равномерное сглаживание со следующими параметрами  $L1 = L2 = K1 = K2 = 2$ . Эта операция позволяет устранить мелкие детали (точки и штрихи) изображения, которые возникли на предыдущем шаге. На третьем шаге производится приведение изображения к бинарной форме. Яркость текущего пикселя сравнивается с пороговым значением. Величина порога в данном случае выбрана экспериментально и равна 180. Яркости со значением, меньшим 180, приписывалось нулевое значение, а яркости, большей или равной 180, приписывалось значение 255 (логическая единица).

На следующем этапе обработки выделены замкнутые области (кластеры), которые не соприкасаются между собой. Предложенный алгоритм сначала вычисляет число соприкосновений  $CNUM_{xy} = \sum_{p=x-1}^{x+1} \sum_{q=y-1}^{y+1} S'_{pq}$ . Если точка с координатами  $(x, y)$  имеет нулевое значение (данный пиксель имеет нулевую яркость) и имеется два соседних элемента также с нулевой яркостью, то  $CNUM = 3$ . В этом случае две соседние точки включаются в кластер исходной точки. Здесь реализуется метод «заражение клетки», когда точка (клетка) заражает (присваивает номер своего кластера) всем соседям, с которыми она контактирует. Если точка принадлежит нескольким кластерам, то последние объединяются. После того, как будут определены все кластеры, находятся максимальные и минимальные значения координат для каждого кластера. Эти значения позволяют судить о размере и форме кластера. Кластеры, имеющие форму и размеры, существенно отличающиеся от аналогичных характеристик искомым объектов, удаляются.

В результате кластеризации на изображении остаются объекты, которые потенциально могут отображать мины. Форма и размер оставшихся элементов изображения не несут полезной информации, поэтому целью дальнейшей операции является получение одинаковых размеров кластеров. В результате выполнения нормализации размеров маленькие кластеры подросли, а большие – ужались (рис. 2). На этом заканчивается этап предварительной обработки изображения.

В зависимости от способа постановки минных полей, они имеют разную конфигурацию. Например, минные поля, устанавливаемые с наземных минных заградителей, имеют правильную форму в виде клеточного поля, а минное поле, установленное системой залпового огня, представляет совокупность эллипсов рассеяния. Следует отметить, что из тактических соображений минное поле, независимо от способа его постановки, имеет определенную плотность. Это связано с тем, что изреженное поле оказывается малоэффективным, а слишком плотное – ведет к большому перерасходу боеприпасов. Это обстоятельство позволяет задать предположительные размеры фигур минных полей.

В данной работе предлагается алгоритм для распознавания клеточного поля, установленного минным заградителем. Алгоритм основан на том, что известны примерные размеры клеток, а угол между сторонами клеток равен примерно  $90^\circ$ . Алгоритм реализует формулу, хорошо известную из школьного курса математики:  $\cos \alpha = \frac{x_1 \cdot x_2 + y_1 \cdot y_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2}}$ , где  $x_1, x_2,$

$y_1, y_2$  – координаты векторов, между которыми вычисляется угол. Векторы проводятся через любые 3 точки (центры мин), одна из которых является их общим началом. Диапазон для косинуса: от -0.15 до 0.15. Расстояние между центрами мин вычисляется по формуле

$\rho = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ , где  $x_1, x_2, y_1, y_2$  – координаты центров мин. Диапазон для расстояния: от 80 до 96 пикселей включительно. Для минных полей с клеточной структурой в качестве признаков идентификации используются числовые значения, характеризующие взаимное расположение мин (рис. 3).

Дальнейшие исследования предполагается проводить в направлении повышения «интеллектуальности» алгоритмов с целью распознавания различных форм минных полей вне зависимости от их ориентации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Использование методов дистанционного зондирования в операциях по гуманитарному разминированию / С.И. Ивашов, В.В. Разевиг, Р.Р. Илющенко и др. // Научно-технические технологии. 2002. №6. С. 27-42.
2. Тоффоли Т. Машины клеточных автоматов / Т. Тоффоли, Н. Марголус. М.: Мир, 1991. 280 с.

### **Большаков Александр Афанасьевич** –

доктор технических наук, декан факультета электронной техники и приборостроения, заведующий кафедрой «Системотехника», профессор кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

### **Булдаков Николай Сергеевич** –

аспирант кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 11.10.10, принята к опубликованию 26.10.10*

О.Н. Долинина

**КЛАССИФИКАЦИЯ ОШИБОК В БАЗАХ ЗНАНИЙ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ**

*Рассмотрены основные типы ошибок в базах знаний экспертных систем, построенных на основе продукций и искусственных нейросетей. Показано, что наиболее общей является ошибка типа «забывание об исключении»; приведены способы отладки экспертных систем.*

Искусственные нейросети, ошибки в базах знаний, отладка экспертных систем, ошибка типа «забывание об исключении»

O.N. Dolinina

**CLASSIFICATION OF ERRORS IN KNOWLEDGE BASES OF EXPERT SYSTEMS**

*There are considered main types of errors in knowledge bases, debugging of expert systems, error “forgetting about exceptions”; described ways of debugging of expert systems.*

Artificial neural networks, errors in knowledge bases, debugging of expert systems, error “forgetting about exceptions”

Знания – это дефицитный ресурс, непосредственно влияющий на научно-технический прогресс и благосостояние. Традиционный способ передачи знаний трудоемок и требует длительного времени. Извлечение знаний у специалистов, их формализация для компьютерной обработки может значительно ускорить и удешевить процесс воспроизводства знаний и их применение. Одним из эффективных способов передачи и использования знаний является создание экспертных систем. Целью создания экспертных систем является разработка программного обеспечения, которое при решении задач, трудных для человека-эксперта, получают результаты, не уступающие по качеству и эффективности решениям, принимаемым экспертом.

Одним из наиболее распространенных способов представления знаний в экспертных системах является продукционный. Еще в 1943 году Пост [1] доказал, что продукционная система является логической системой, эквивалентной машине Тьюринга. Продукционные системы универсальны, т.е. любая формальная система, оперирующая символами, может быть реализована в виде одной из продукционных систем Поста.

Продукционная база знаний (ПБЗ) определяется совокупностью:

$$P = (F, R, G, C, I), \quad (1)$$

где  $F$  – конечное множество фактов о решаемой проблеме. Каждый факт может быть установленным или не установленным, совокупность установленных фактов задает некоторую ситуацию в предметной области.  $R$  – множество продукций или правил, включающее правила вида

$$r_m: \text{ЕСЛИ } f_i \text{ И } f_j \dots \text{ И } f_n \text{ ТО } f_k, \quad (2)$$

где  $r_m$  – имя правила,  $r_m \in R$ ;  $f_i, f_j, \dots, f_n$  – условия выполнения правила;  $f_k$  – следствие правила,  $f_i, f_j, \dots, f_n, f_k \in F$ ;  $G$  – множество целей или терминальных фактов ЭС;  $I$  – интерпретатор правил, реализующий процесс вывода.  $C$  является множеством разрешенных комбинаций фактов. В множество  $C$  не входят, например, комбинации, в которых установлены одновременно какие-либо два факта, взаимно исключающие друг друга. База правил  $R$  и множество целей  $G$  образуют базу знаний.

Функционирование интерпретатора  $I$  состоит в проверке истинности некоторых целей в заданной для проблемной области ситуации. При этом логический вывод может осуществляться интерпретатором в прямом или обратном направлении.

Можно составить конечный список  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  элементарных условий (фактов) так, что условие выполнимости каждого правила  $r_m$  из  $R$  состоит в одновременном выполнении некоторой совокупности  $\{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}\}$  элементарных условий. Действием продукции считаем установление одного из фактов списка  $F$ .

При создании систем, основанных на знаниях, важным этапом является этап отладки. На этапе отладки проверяется компетентность систем на предмет соответствия поставленным целям решений, выдаваемых ЭС. Этот процесс продолжается до тех пор, пока эксперт не решит, что система достигла требуемого уровня компетентности.

Так как база знаний наполняется человеком-экспертом, то в силу своих психологических особенностей эксперт может допускать различного рода ошибки. В работе американского исследователя Б. Маркота [2] приводятся данные, что процент ошибок человека-эксперта при внесении информации в БЗ в среднем равен 15.

Введем понятие отладки ЭС в узком смысле слова.

Отладкой ЭС в узком смысле называется процесс выявления, локализации ошибок в БЗ, а также коррекции БЗ, не связанной с выбором нового способа представления знаний.

Существующее состояние дел в области разработки принципов, методов и средств контроля качества БЗ ЭС в целом может быть охарактеризовано следующим образом:

Для отладки БЗ ЭС используются две основных группы методов:

1) методы статического анализа (верификация), осуществляющие проверку БЗ на уровне формального контроля качества, не требующие запуска интерпретатора системы;

2) тестирование, заключающееся в прогоне ЭС на заданном множестве тестовых данных и сравнение результатов вывода ЭС с эталонными, определяемыми экспертами.

В литературе выделяют следующие основные классы ошибок в БЗ: неполнота, избыточность, противоречивость.

Для каждого класса выделяются типы ошибок, например, неполнота БЗ может характеризоваться недостижимыми, пропущенными, терминирующими продукциями (которые могут быть выполнены, но их заключения не являются целью вопроса и отсутствуют среди посылок других продукций). Избыточность БЗ характеризуется дублирующими продукциями,

а также продукциями, не ведущими ни к какой цели.

Структурное представление БЗ в виде И/ИЛИ графа дает наиболее наглядное представление базы знаний.

Введем следующие определения.

*Определение 1.* Структурной ошибкой в продукционной БЗ называется ошибка, выявляемая на основе анализа И/ИЛИ графа.

*Определение 2.* БЗ является статически корректной, если она не содержит структурных ошибок, т.е. БЗ непротиворечивая, полная и неизбыточная.

На рис. 1 правило  $r_2$  является лишним, т.к. для установки  $f_1$  достаточно фактов  $f_2$  и  $f_3$  (правила  $r_1$ ).

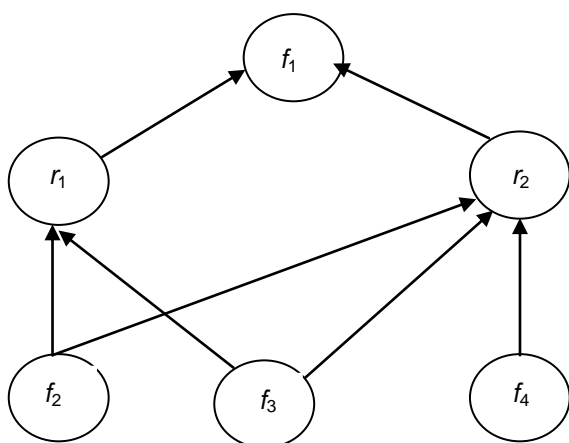


Рис. 1. Включающие правила

Пример противоречивых правил приведен на рис. 2.

Рис. 3 иллюстрирует пример неполноты БЗ, т.к. не существует правила, ведущего в вершину  $g_2$ . На рис. 4 изображен пример избыточности БЗ, т.к. существует лишнее правило  $r_2$ , не ведущее ни к какой цели.

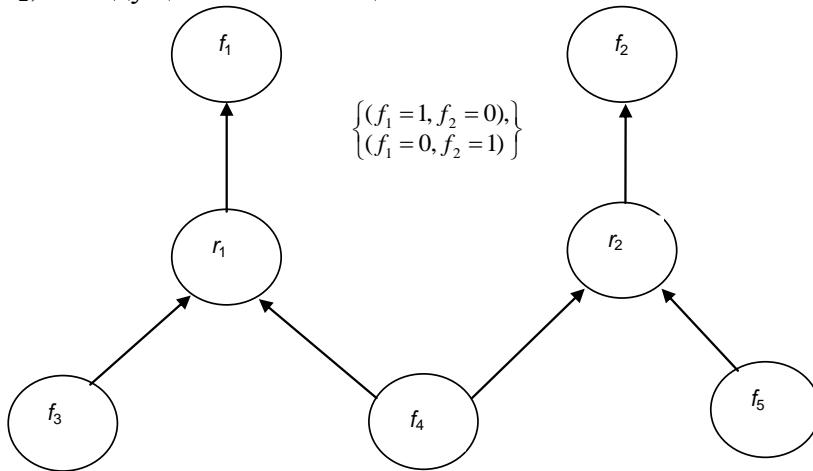


Рис. 2. Противоречивые правила

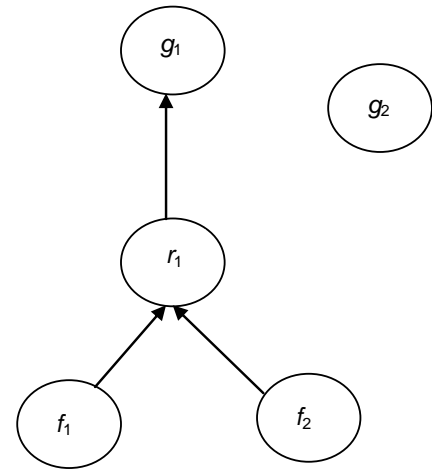


Рис. 3. Отсутствующие правила

Отметим, что анализ литературы показал, что при описании процесса статического анализа российские и зарубежные исследователи зачастую используют различные определения. Некоторые исследователи в своих работах аналогичные методы и процедуры определяют как верификацию. Для устранения неоднозначности в определениях будем использовать только термин «статический анализ».

Отметим, что методы статического анализа хорошо формализуемы и поэтому сравнительно легко могут быть реализованы в виде программных модулей. Кроме того, они не нуждаются в оценке решения экспертом. Но в то же время, методы статического анализа не обеспечивают достаточную проверку БЗ, например, БЗ может быть непротиворечивой, но, тем не менее, включать содержательные ошибки. Одной из важнейших проблем является проблема выявления разного рода противоречий в базах знаний.

Если все факты, которыми оперирует ЭС, могут быть верны одновременно, то никаких противоречий в ней не возникнет. Противоречия возникают из-за содержательных связей между фактами, которые запрещают некоторые связи. В некоторых предметных областях существуют несовместимые системы взглядов, причем эта несовместимость может проявляться не сразу.

Учитывая вышесказанное, в работе [3] введены базовые понятия противоречивости СП. Полной непротиворечивостью называют такое состояние системы продукций, если из допустимых состояний можно вывести только допустимые.

$$Y_1(X) = X. \quad (3)$$

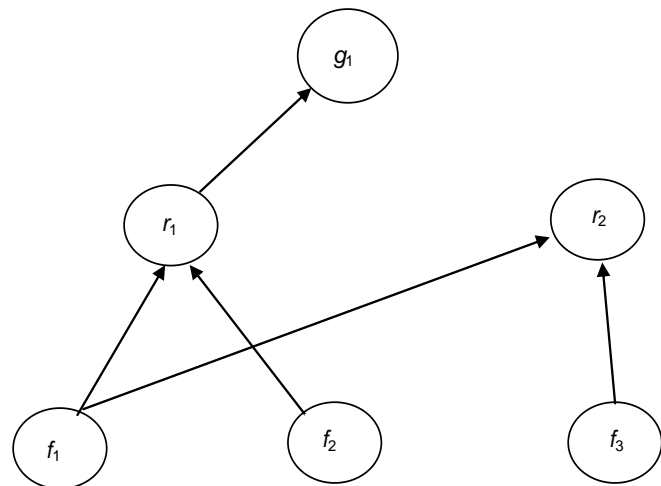


Рис. 4. Пример лишних правил

Этим понятием можно пользоваться лишь тогда, когда есть уверенность, что все допустимые состояния фактически реализуются, т. е. имеется полное и точное описание реальной предметной области. Такое вряд ли возможно при работе со сложной областью знаний. Поэтому предлагается отбросить указанный тип противоречий за счет сужения множества исходных данных и рассматривать действительно нетерпимые противоречия.

Другими словами, предлагается считать ЭС внутренне непротиворечивой, если ее можно сделать вполне непротиворечивой и эффективной, сузив множество допустимых состояний.

Во внутренне противоречивой ЭС существует цепочка вывода, которая приводит к противоречию всегда, когда она применяется.

Подводя итог рассмотренным противоречиям, отметим, что претендующей на доверие ЭС достаточно быть вполне непротиворечивой, что означает следующее: БЗ не должна содержать внутренних противоречий, но может содержать внешние, т.е. продукции, входящие в состав БЗ, могут противоречить модели мира.

Формализуем эти определения на основе терминологии теории графов. Введем следующие определения.

*Определение 1.* Факты, соответствующие вершинам графа  $T$  с нулевой полустепенью захода, будем называть входными фактами  $P$ . Все другие факты будем считать внутренними.

*Определение 2.* Правило  $r_i \in R$  лишнее, если не существует вершины  $g_i$  такой, что в  $T$  имеется путь из вершины  $r_i$  в вершину  $g_i$ .

*Определение 3.* Во множестве  $R$  отсутствуют правила для  $g_i$ , если вершина  $g_i$  графа  $T$  изолированная.

*Определение 4.* ПБЗ называется противоречивой, если существует набор фактов, если  $S_i \in C$ , такой, что из  $S_i$  интерпретатором  $I$  может быть получен набор фактов  $S_j \notin C$ .

*Определение 5.* Условие правила  $r_i$  истинно всегда, когда истинно условие  $r_j$  и дуги, исходящие из вершин  $r_j$  графа  $T$ , ведут в одну и ту же вершину  $f_i$ .

Признаком ошибок эксперта является также наличие циклов в И/ИЛИ графе ПБЗ.

Все рассмотренные типы ошибок могут быть обнаружены методами статического анализа, т.е. без запуска интерпретатора системы  $I$  путем анализа графа  $\Gamma$ .

Если статический анализ уже применен и  $P$  не является противоречивой, не содержит включающих, лишних правил, а И/ИЛИ граф  $\Gamma$  свободен от циклов, то будем говорить, что  $P$  статически корректна. Однако, ПБЗ может быть статически корректной, но выдавать неверные результаты при запуске интерпретатора. Причина этого состоит в наличии ошибок в самих правилах ПБЗ.

Такие ошибки не могут быть обнаружены методами статического анализа, т.к. не отражаются на И/ИЛИ графе ПБЗ. Средством обнаружения ошибок в правилах является тестирование. Тест ПБЗ, в общем случае, представляет собой набор установленных фактов  $S \in C$  и соответствующее множество  $G' \in G$  целей системы, которые при этом достигаются [4]. Для получения эталонных значений  $G'$  могут быть использованы дополнительные эксперты, или те же, кто участвовал в формировании базы знаний. Такой подход также позволяет обнаруживать ошибки в правилах. Дело в том, что эксперт обладает несколькими дублирующими системами рассуждений. Допуская ошибки при формировании ПБЗ большой размерности, он как правило, дает правильные решения для конкретной постановки задачи.

Наиболее грубая ошибка в правиле имеет место (2), если факт  $f_i$  в данной предметной области никогда не может быть установлен в присутствии фактов  $f_1, \dots, f_k$ . Именно такие ошибки обнаруживают тесты, построенные по критерию покрытия операторов [5]. Действительно, данный критерий предусматривает однократную активизацию каждого правила. Если факт – следствие некоторой продукции на самом деле не должен устанавливаться при выполнении условия продукции, то ЭС сообщит об истинности какой-либо цели, которая не должна удовлетворяться в данной ситуации.



Более реален случай, когда факт – следствие  $f_i$  иногда должен устанавливаться при установленных фактах  $f_1, \dots, f_k$ , входящих в условие продукции, а иногда не должен. Это зависит от состояния других фактов предметной области (ПО). Очевидно, что тестирование по критерию покрытия операторов не гарантирует обнаружения ошибок этого наиболее общего класса.

В общем случае, вследствие ошибок эксперта множество фактов ПБЗ  $F$  может содержать не все факты, существенные для рассматриваемой ПО. В результате некоторые правила из  $R$  могут оказаться неверными при установке некоторых фактов, не входящих в  $F$ . Анализ ПБЗ не позволяет сформировать тестовый пример, обеспечивающий обнаружение подобных ошибок. В дальнейшем предполагается, что множество  $F$  содержит все факты, установка которых может влиять на справедливость правил  $R$ . Соответственно, класс обнаруживаемых ошибок ограничивается этим допущением.

Наиболее сложной для выявления является ошибка, связанная с так называемым «забыванием об исключении» в предметной области. Формальная модель ошибок типа, который можно назвать также «забывание об исключении», состоит в следующем: правило выполняется всегда, за исключением того случая, когда в ПБЗ установлен набор фактов

$$\{f_1, f_2, \dots, f_k\} = S \in C. \quad (4)$$

Если все факты, которыми оперирует ЭС, могут быть верны одновременно, то никаких противоречий в ней не возникнет. Противоречия возникают из-за содержательных связей между фактами, которые запрещают некоторые связи. В некоторых предметных областях существуют несовместимые системы взглядов, причем эта несовместимость может проявляться не сразу. Например, вполне правильными являются следующие продукции:

$$\begin{aligned} r_1: & \text{ЕСЛИ животное теплокровное И имеет крылья, ТО птица;} \\ r_2: & \text{ЕСЛИ животное теплокровное И имеет 4 лапы, ТО зверь.} \end{aligned} \quad (5)$$

до тех пор, пока не встретится «летучая мышь». ПС (5) для летучей мыши делает вывод «и птица, и зверь». Этот вывод противоречит естественной связи между фактами «птица - это не зверь», без которой классификация вообще бессмысленна.

Другим часто используемым типом представления знаний в ЭС являются искусственные нейросети (ИНС). Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что, в случае успеха сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке. Важной проблемой остается подбор обучающей выборки, т.е. данных, на которых нейросеть будет принимать решения.

Отметим, что при отладке ИНС статический анализ не будет эффективным в смысле выявления таких ошибок, как неполнота, избыточность т.к. сам механизм функционирования нейросети предполагает отсутствие таких ошибок, которые можно выявить на структуре графа как неполнота, избыточность.

Однако для ИНС можно ввести ошибки для обучающего множества, например, понятие неполноты для обучающего множества, что подразумевает отсутствие у обучающего множества свойства репрезентативности, то есть наличия достаточного количества примеров для представления всей генеральной совокупности, а не только отдельных её классов.

Противоречивость означает наличие обучающих примеров с идентичными входными, но различными выходными параметрами. Заметим, что в реальных ИНС наличие огромного числа связей затрудняет нахождение внутренних противоречий на графовой модели.

Отметим, что ошибка типа «забывание об исключении»(4) является наиболее общей и покрывает все остальные ошибки.

Формальная модель ошибки типа «забывание об исключении» в терминах ИНС состоит в следующем:

Значение выходного признака  $Y(X)$  всегда соответствует правильному значению за исключением того случая, когда установлен набор входных нейронов  $X$

$$\{x_1, x_2, \dots, x_k\} = I \in C. \quad (6)$$

В заключении отметим, что единственным способом обнаружения ошибки типа «забывание об исключении» является тестирование. Для решения задачи генерации тестовых наборов для продукционных БЗ или основанных на многослойном персептоне, предлагается подход, основанный на преобразовании БЗ к логической сети (ЛС) и применении к последней методов технической диагностики. В случае многослойного персептрона предварительно необходимо провести процедуру извлечения правил вида (6, 7). В работе [4] разработана методология тестирования продукционных баз знаний при помощи алгоритма поиска константной неисправности в логической сети PODEM (Path Oriented DEcision Making). В технической диагностике под константной неисправностью понимаются ошибки типа «константный ноль (единица)», когда на одном или нескольких выходах системы постоянно присутствует нулевой (единичный) сигнал независимо от входных значений [10]. Ошибку типа «забывание об исключении» можно рассматривать как неисправность «константный 0» логической сети, которая проявляется только при каком-то наборе значений сигналов ЛС. Также в работе [4] доказано, что если тест выявляет ошибки такого типа, то этот тест гарантированно выявляет ошибки и всех других типов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Post E.L. Formal Reductions of the General Combinatorial Decision Problem / E.L. Post // American Journal of Mathematics. V.65. 1943. P. 197-215.
2. Marcot V. Testing your knowledge base / V. Marcot // AI Expert. August. 1987. P.43-47.
3. Поспелов И.Г., Поспелова Л.Я. Динамическое описание систем продукции и проверка непротиворечивости продукционных экспертных систем. / И.Г. Поспелов, Л.Я. Поспелова // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1987. N.1. С. 184-192.
4. Долинина О.Н. Обнаружение ошибок типа «забывание об исключении» в продукционных базах знаний экспертных систем / О.Н. Долинина. СГТУ. Саратов, 1997. Деп. в ВИНТИ, N 678-B97.
5. Tepandi J. Comparison of Expert System Verification Criteria: Redundancy / J. Tepandi // Proc.ECAI 90 Conf. Stockholm, 1990. P.49-62.
6. Долинина О.Н. Применение методов технической диагностики для отладки баз знаний нейросетевых экспертных систем / О.Н. Долинина, А.К. Кузьмин // Информационные технологии, 2 (150), 2009. с.34-38.
7. Долинина О.Н. Метод генерации тестов для отладки нейросетевых экспертных систем / О.Н. Долинина, А.К. Кузьмин // Вестник ТГТУ. Т.16. №3. 2010. С. 519-528.

#### **Долинина Ольга Николаевна –**

кандидат технических наук, декан международного факультета прикладных информационных технологий, заведующая кафедрой «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 05.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

О.Н. Долинина, А.В. Ермаков

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GRID -ВЫЧИСЛЕНИЙ

*Описан метод видеоинформации с использованием ресурсов локальных вычислительных сетей, в частности GRID-вычислений также требует повышения эффективности на основе вычисления числа задач в плане обработки видеофайла и параметров среды обработки.*

GRID, обработка видео, расписание задач

O.N. Dolinina, A.V. Ermakov

## INCREASING OF VISUAL INFORMATION PROCESSING EFFICIENCY BY USING OF GRID COMPUTING

*Video information processing represents a complex problem to which decision there are various approaches. One of this approaches is a video processing with use of resources of local computer networks. This approach is the best for problems with average volume of the processed information and medium requirements by processing time. Unfortunately this method give us some lacks which can be solved with use of GRID-systems. However GRID-calculations also demands increase of efficiency by finding the number of tasks in a job and parameters of processing environment.*

GRID, video processing, tasks scheduling

Современные вычислительные системы достигли значительных мощностей и способны справляться с разнообразными задачами. Однако особенную остроту приобретает эффективное использование существующих ресурсов, т.к. часто они простаивают. Идея GRID-системы заключается в возможности использования существующих ресурсов (от кластеров до офисных компьютеров) из-под единого интерфейса, но в рамках существующих административных доменов.

Существующие методы представления видеоинформации разработаны с целью обеспечения наиболее компактного способа хранения видеофайлов. Это требование выполняется благодаря внутрикадровому сжатию, в котором применяется дискретно-косинусное преобразование (ДКП), и межкадровому сжатию, в котором применяется предсказание смещения макроблоков между кадрами. Структура видеофайла позволяет реализовать три основных алгоритмических подхода к обработке: параллельная обработка внутрикадрового сжатия (ДКП); параллельная или распределенная покадровая обработка; распределенная обработка независимых групп изображений.

Указанные методы могут быть реализованы с помощью одной из вычислительных архитектур. Среди существующих подходов можно выделить: использование локальных вычислительных машин, специализированных аппаратных плат обработки, ресурсов локальных вычислительных сетей (ЛВС), вычислительных кластеров.

Недостатком существующих методов аппаратной обработки является небольшой набор решаемых ими задач. Методы, основанные на программной обработке видеоинформации, имеют более гибкую структуру. Поэтому для многих задач наиболее приемлемой с точ-

ки зрения отношения стоимости обработки к её времени является обработка с использованием ресурсов ЛВС. Однако этот метод ограничен в масштабируемости вычислительной среды, и в нем не решена проблема обеспечения эффективности обработки.

Под эффективностью будем понимать достижение минимального времени обработки видеофайла на основе использования только тех вычислительных узлов, включение которых в обработку позволяет уменьшить ее время.

Применение GRID-вычислений позволяет реализовать концепцию обработки видеоинформации с использованием ресурсов ЛВС, устранив присущие ей недостатки за счет, во-первых, использования большого числа узлов, предоставляемых пользователями GRID-систем; во-вторых, использования существующих средств обеспечения надежности и безопасности обработки. Однако существующие методы обработки данных с использованием GRID-вычислений не имеют механизмов, обеспечивающих эффективность для задачи обработки видеоинформации. Для решения этой задачи предлагается метод, разработанный на основе модели определения времени обработки видеофайла в GRID-среде с заданным объемом доступных ресурсов [1]. Рассмотрим алгоритм предлагаемого метода.

1. Принимаем размер одного задания равным одной группе изображений, закодированных независимо от остальных (Group of pictures (GOP)) и получаем число заданий ( $TN$ ) в одном плане, который представляет собой весь обрабатываемый видеотрезок, а задание, таким образом, состоит из одного отрезка этого файла.

2. Определяем методом дробления такое число вычислительных узлов ( $GN$ ), что среднее значение  $f(GN)$  следующих за ним  $n$  точек не менее  $f(GN)$ , где  $f(GN)$  вычисляется на основании модели, предложенной в [1].

3. Заполняем полученное число узлов реально существующими в сети узлами.

4. Определяем методом дробления минимальное  $f(GN)$  для существующих узлов.

5. Определяем методом дробления минимальное  $f(TN)$ , при этом основным условием является то, что есть такое число  $X$ , что результат операции

$$TN = JK/NK * X, \quad (1)$$

является целым числом, т.е.,  $X$  – это число GOP в одном задании плана, где  $JK$  – число кадров в видеотрежке,  $NK$  – число кадров в одном GOP.

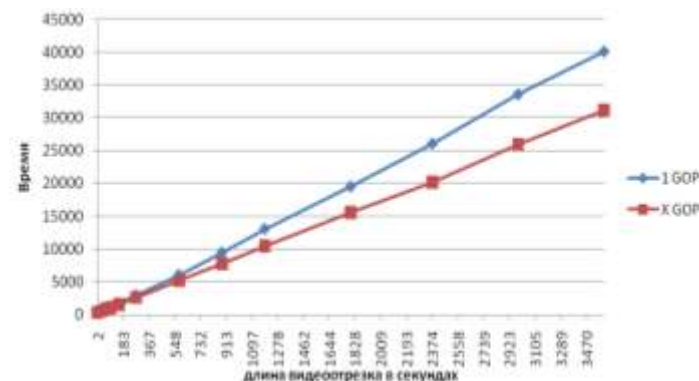
6. В случае если удалось улучшить значение  $f(GN, TN)$ , возвращаемся к шагу 4, иначе считаем, что достигнуто минимальное значение.

В результате применения этого метода получаем на выходе значение прогноза времени обработки плана, а также значения  $TN$  и  $GN$ . Исходный видеофайл разбивается на  $TN$  отрезков,

каждый из которых будет представлять отдельное задание по обработке.

Полученные характеристики передаются в планировщик GRID-среды как целевой набор ресурсов, который должен быть использован для обработки данного плана.

Для проверки работоспособности предложенного метода проведены эксперименты с использованием разработанного программного комплекса, осуществляющего обработку видеоинформации, основанную на системе OurGrid [2]. Система OurGrid состоит из трех частей: MyGrid – служб, отвечающих за управление заданиями; Peer – служб, отвечающих за управление ресурсами; Gum – служб запуска заданий на вычислительных узлах.



Зависимость времени обработки видеоотрезка от его длины

– служб запуска заданий на вычислительных узлах.

Для обеспечения обработки видеоинформации с использованием GRID-системы Ourgrid реализован программный комплекс, состоящий из двух частей: интерфейсной и вычислительной.

Интерфейсная часть осуществляет ряд функций, необходимых для формирования и запуска пользовательских планов на исполнение. Входными данными этой программы являются видеофайл и задание по обработке. Результатом выполнения плана является обработанный видеофайл. Вычислительная часть передается на вычислительный узел совместно с файлом данных и отвечает за выполнение непосредственно обработки данных.

Проведенные эксперименты позволяют сравнить время обработки видеофайла посредством разработанного метода и базового для данной работы метода SA (Storage Affinity) [3], используемого в системе OurGrid для обработки планов, задания которых содержат значительные объемы данных. Обработка видеоинформации в этом случае предполагает, что каждое задание представляется одной GOP.

Рассмотрим эксперимент, где входными данными являются:  $JK = 30, \dots, 360$  с;  $NK = 10$  кадров; время обработки одного  $NK$ ,  $NKK = 30 \text{ мс} \cdot 10^{-2}$ ; объем данных одного  $NK$ ,  $NKV = 0,5 \text{ МБ}$ ;  $GN = 9$ .

На рисунке показаны зависимости времени обработки видеоотрезка от его длины, полученные с помощью метода SA (линия «1 GOP») и разработанного метода (линия «X GOP»). Анализ этих зависимостей позволяет сделать вывод о том, что их характер является линейным. Следовательно, соотношение времени обработки видеофайла методом SA ко времени обработки разработанным методом остается постоянным для видеоотрезков любой длины. Так, для рассмотренного случая достигнуто сокращение времени обработки на 25%. Для остальных экспериментов данное значение варьируется в зависимости от соотношения времени передачи видеоотрезка ко времени его обработки, и колеблется в диапазоне от 0 до 50%.

Таким образом, результаты экспериментов доказывают повышение эффективности обработки видеоинформации за счет сокращения времени ее обработки при сохранении числа узлов, либо его уменьшении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долинина О.Н. Обработка видеоинформации с использованием GRID-вычислений / О.Н. Долинина, А.В. Ермаков // Телематика'2010 : телекоммуникации, веб-технологии, суперкомпьютинг : сб. статей участников Всерос. конкурса научных работ студентов и аспирантов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. С. 197-203.
2. OurGrid: An Approach to Easily Assemble Grids with Equitable Resource Sharing / N. Andrade, W. Cirne, F. Brasileiro et al. // Proc. 9th JSSPP, June 2003.
3. Da Silva D. Trading cycles for information: using replication to schedule bag-of-tasks applications on computational grids / D. da Silva, W. Cirne, FV. Brasileiro // Springer, Berlin, 2004.

**Долинина Ольга Николаевна** –

кандидат технических наук, декан международного факультета прикладных информационных технологий, заведующая кафедрой «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета

**Ермаков Александр Вадимович** –

аспирант кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 05.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

УДК:004.9:[656.625.078.89.004.12:658.012]

**О.М. Проталинский, А.А. Ханова, И.О. Бондарева**

### **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГРУЗОВОГО ПОРТА**

*Рассмотрены имитационная модель грузового порта, включающая создание структурной и Q-схемы технологических процессов в грузовом порту, обобщенная, детальная и логическая схемы моделирующего алгоритма. Представлено подбор параметров вероятностных распределений случайных величин, входящих в систему. Модель проверена на адекватность реальному объекту. Описано планирование и проведение имитационных экспериментов на основе использования полного факторного плана типа  $2^k$ .*

Технологические процессы грузового порта, моделирование, распределения вероятностей случайных величин, планирование эксперимента, полнофакторный эксперимент, эффекты факторов

**O.M. Protalinsky, A.A. Khanova, I.O. Bondareva**

### **IMITATING MODEL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF CARGO PORT**

*The imitating model of cargo port including creation structural and Q-schemes of technological processes in the cargo port, the generalized, detailed and logic schemes of modeling algorithm is described. Selection of parameters of likelihood distributions of the random variables entering into system is described. The model is checked up on adequacy to real object. Planning and carrying out of imitating experiments on the basis of use of the full factorial plan of type  $2^k$  is described.*

Technological processes of cargo port, modeling, distributions of probabilities of random variables, experiment planning

Современный этап развития транспортных перевозок характеризуется ростом требований к срокам доставки грузов, качеству перевозок, сокращению затрат на транспортно-складские операции. Возникают крупные научные проблемы, связанные с управлением оптимальной сбалансированностью и качеством транспортных магистралей, достижением эффективности функционирования транспортных узлов (ТУ). В них начинается и заканчивается доставка грузов, происходят процессы перевалки груза с одного вида транспорта на другой. Более трети транспортных узлов в Российской Федерации связаны с перевозками водным транспортом, т.е. с ТУ, организационно-технологической основой которых являются морские и речные грузовые порты. В условиях кризиса, при определенном дефиците финансовых ресурсов для строительства новых портов и реконструкции существующих направлением повышения эффективности работы ТУ является оптимизация управления технологическими процессами порта, его инфраструктурой на основе применения современных информационных технологий. Технологические процессы в ТУ разнообразны и имеют большое число разновидностей. Для исследования выделим ограниченное число типовых технологических процессов: перегрузочные процессы; процессы транспортировки грузов; складские процессы; вспомогательные процессы.

Сложность управления технологическими процессами грузового порта определяется разнообразием перегрузочных работ по характеру и трудоемкости, стохастическим характе-

ром интенсивности перегрузочных процессов и времени нахождения транспортных средств в грузовом порту, непрерывностью перегрузочных работ, зависимостью деятельности грузового порта от движения транспортного флота. Конкуренция между перегрузочными комплексами за овладение грузовой базой требует от них повышения качества обработки грузов, увеличения интенсивности грузовых, складских и прочих работ. Особенностью технологических процессов в порту является их непрерывное развитие, обусловленное как изменением потребностей в переработке тех или иных грузов, так и постоянно изменяющейся обстановкой внутри порта и в обслуживаемых им регионах. Указанные факторы приводят к невозможности аналитического описания и построения формальных моделей, что значительно снижает эффективность управления подобными слабоформализуемыми технологическими процессами, а часто делает его невозможным. В качестве инструмента для анализа деятельности порта выбрано имитационное моделирование. При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования рассматриваемой системы во времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы.

Моделируемая система представляет собой процесс обслуживания потока заявок, судов и тепловозов с грузами. При этом характерным для него является случайное появление заявок на обслуживание, а также завершение процессов погрузки/разгрузки кранами и погрузчиками в случайные моменты времени. Рассматриваемый процесс имеет место непрерывно-стохастический характер протекания. Структурная схема процесса технологических процессов в грузовом порту приведена на рис. 1 а. Используя символику Q-схем, структурная схема модели может быть представлена в виде, показанном на рис. 1 б.

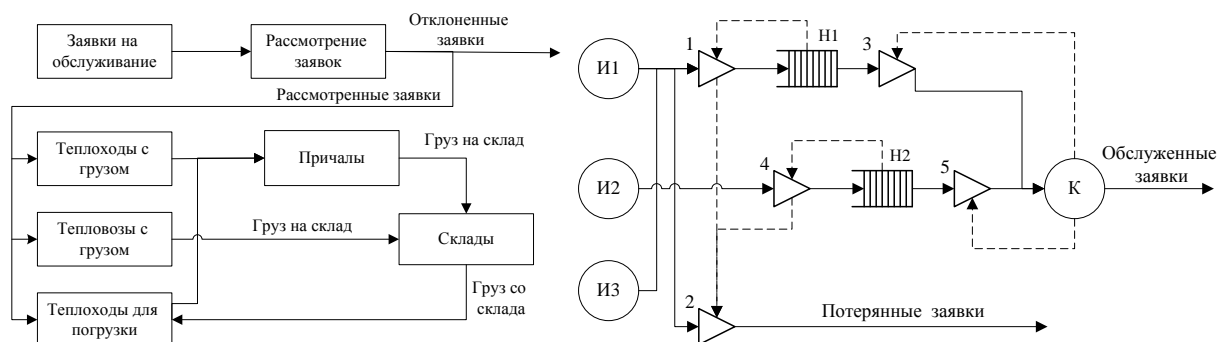


Рис. 1. Структурная (а) и Q-схема (б) технологических процессов в грузовом порту (И1, И2 и И3 – источники; N1, N2 – накопители; К – канал)

Источник И1 имитирует процесс поступления груза железнодорожным транспортом, И2 – процесс поступления теплоходов с грузом, И3 – процесс поступления теплоходов для осуществления погрузки. Накопители N1 и N2 имитируют заполнение причалов порта и заполнение железнодорожных путей порта соответственно. Канал К имитирует процесс осуществления погрузочно-разгрузочных работ. Клапаны 1...5 с соответствующими управляющими связями (пунктирные линии) посредством блокировок входов и выходов накопителей отражают управление заполнением и использованием ресурсов грузового порта (кранов и погрузчиков). Принцип работы данной Q-схемы следующий. Клапан 1 на входе N1 открыт, если N1 не заполнен, в противном случае он закрыт. Клапан 2 открыт, если клапан 1 на входе N1 закрыт, в противном случае он закрыт. Клапан 4 на входе N2 открыт, если N2 не заполнен, в противном случае он закрыт. Клапаны 3 и 5 открыты, если К свободен, в противном

случае они оба закрыты. Заявки, прошедшие через К, считаются обслуженными, через клапан 2 – считаются потерянными.

Удобной формой представления логической структурной модели технологических процессов функционирования систем и машинных программ является обобщенные и детальные логические схемы моделирующих алгоритмов, а также схемы программ. Рассмотрим обобщенную схему моделирующего алгоритма (рис. 2). Каждый блок схемы детализирован, детализация технологического процесса погрузка груза на теплоход показана на рис. 3. В свою очередь, блоки, изображенные на рис. 3, были детализированы (рис. 4).

На основе детальной схемы моделирующего алгоритма можно построить логическую схему моделирующего алгоритма, представляющую логическую структуру модели процесса функционирования системы. Однако построение данной схемы становится возможным только при наличии заданных параметров моделирования.

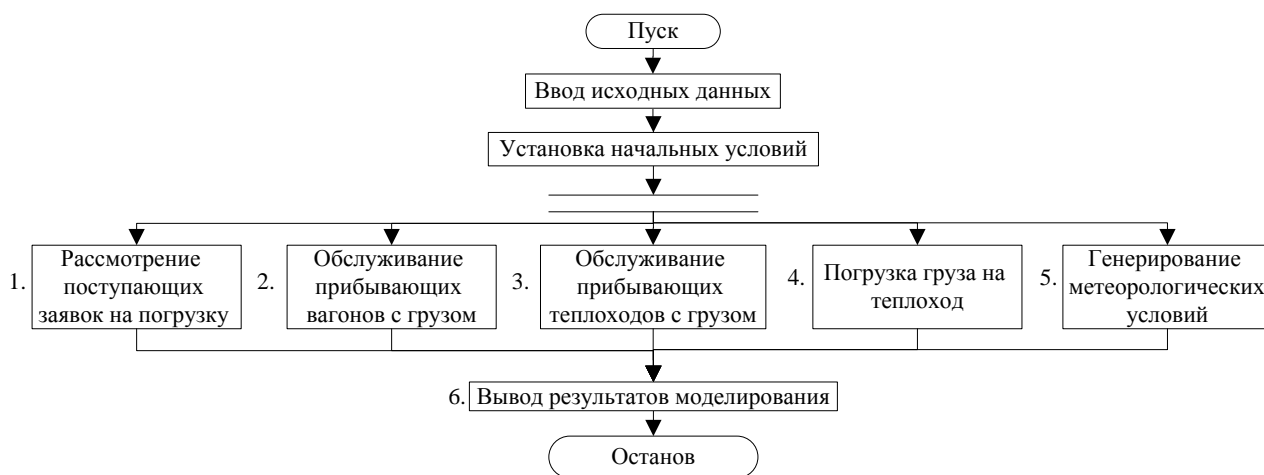


Рис. 2. Обобщенная схема моделирующего алгоритма

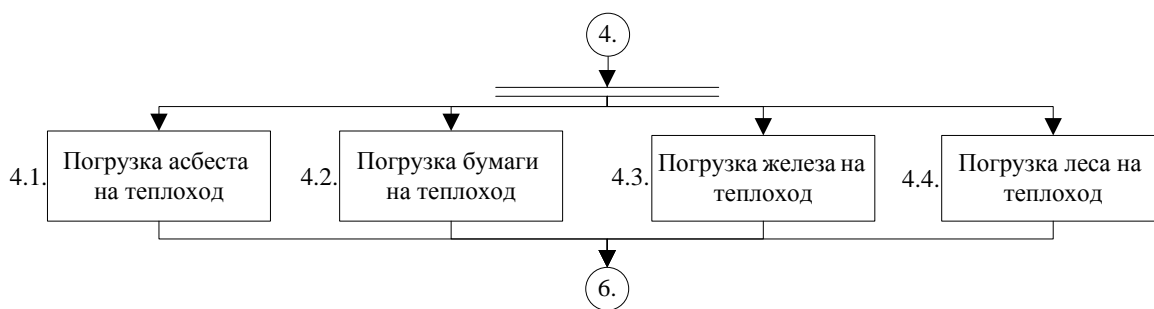


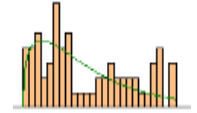
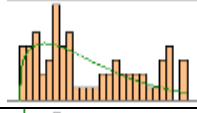
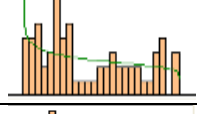
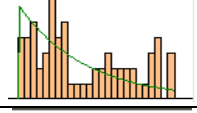
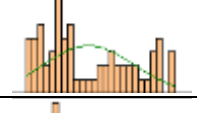
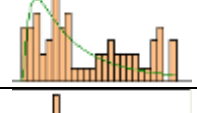
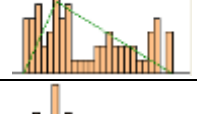
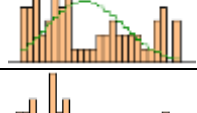
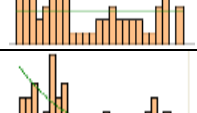

Рис. 3. Детальная схема моделирующего алгоритма (Детализация блока 4 «Погрузка груза на теплоход»)

Для системы, отражающей деятельность грузового порта, можно выделить следующие факторы случайности: интервал между моментами поступления заявок на погрузку; интервал времени между моментами принятия заявки и поступления груза в порт; интервал времени между моментами отгрузки груза в порт и прихода транспорта, на который этот груз необходимо погрузить; процентное соотношение заявок по различным типам груза; процентное соотношение типов транспорта, на котором груз прибывает в порт; вероятность утери груза во время погрузки; количество утерянного во время погрузочно-разгрузочных работ груза; критическая величина утерянного груза, т.е. то количество груза, утеря которого не





Значения параметров вероятностных распределений и соответствующие им значения критериев согласия для фактора случайности «Интервал между моментами поступления заявок на погрузку асбеста»

Тип распределения	Параметры распределения	Ошибка (метод наименьших квадратов)	Соответствующее $p$ -значение	Рисунок
Гамма	23.5 + GAMM(7.41, 1.42)	0.014011	<0.005	
Вейбулла	23.5 + WEIB(11.3, 1.31)	0.014178	0.00796	
Бета	23.5 + 25 * BETA(0.828, 1.07)	<b>0.012276</b>	0.0335	
Эрланга	23.5 + ERLA(10.5, 1)	0.014780	<0.005	
Нормальное	NORM(34, 7.51)	0.021408	<0.005	
Логнормальное	23.5 + LOGN(12.2, 17.1)	0.017206	<0.005	
Треугольное	TRIA(23.5, 29, 48.5)	0.023170	<0.005	
Пуассоновское	POIS(34)	0.026402	<0.005	
Равномерное	UNIF(23.5, 48.5)	0.015148	<b>0.114</b>	
Экспоненциальное	23.5 + EXPO(10.5)	0.014780	<0.005	

Из данных табл. 1 видно, что наименьшее значение ошибки распределения, определенной по методу наименьших квадратов, соответствует Бета-распределению с указанными параметрами. Данное распределение также подходит и по критерию хи-квадрат (соответствующее  $p$ -значение больше 0.005). По критерию хи-квадрат наиболее подходящим является равномерное распределение. В данном случае в качестве исследуемых входных данных выступают целые числа (количество часов между моментами поступления заявок на погрузку асбеста), поэтому в этом случае вычисляется критерий хи-квадрат для всех распределений, если бы в качестве статистических данных выступали действительные числа, то вычисляется критерий Колмогорова-Смирнова. В этих случаях  $p$ -значение – это наибольшее значение вероятности возникновения ошибки при использовании соответствующего распре-

ления. Чем выше это значение, тем лучше соответствующее ему распределение подходит для задания исследуемых значений статистической информации.

Исходя из того, что в дальнейшем планируется настраивать значения входных параметров с целью анализа поведения системы и планирования мероприятий по повышению эффективности технологических процессов грузового порта, в качестве входного распределения для фактора случайности «Интервал между моментами поступления заявок на погрузку асбеста» было выбрано равномерное распределение. Описанный процесс подбора распределения вероятностей осуществлен для всех факторов случайности.

С учетом подобранных вероятностных распределений на основе детальной схемы моделирующего алгоритма построена логическая схема моделирующего алгоритма (рис. 5), указывающая упорядоченную во времени последовательность логических операций, связанных с решением задачи моделирования.



Рис. 5. Логическая схема моделирующего алгоритма (расшифровка блока 4.1)

На основе логической схемы моделирующего алгоритма построена схема программы, отображающая порядок программной реализации моделирующего алгоритма программного обеспечения Arena 9.0. Схема программы представляет интерпретацию логической схемы моделирующего алгоритма разработчиком программы на базе алгоритмического языка программы реализации модели.

Имитационная модель технологических процессов грузового порта, разработанная на основе собранных данных состоит из следующих групп модулей: 1) основные модули; 2) управляющий модуль; 3) модули анимации. К основным модулям относятся: рассмотрения заявок, предназначенный для моделирования процесса первичной работы с грузом на осно-

вании поступившей заявки; прибытия судов с грузом, используемый для моделирования процессов прихода теплоходов и выгрузки находящегося на них груза; прибытия вагонов, необходимый для моделирования процессов прихода вагонов и выгрузки находящегося на них груза; погрузки груза на теплоход, моделирующий процесс погрузки грузов на суда. К управляющему относится модуль моделирования метеорологических факторов, включающий следующие субмодели: моделирование ледостава, тумана и ветреной погоды. Анимационный модуль предназначен для динамического отображения технологических процессов осуществления перегрузочных работ.

Для исследования деятельности порта выбраны следующие показатели технологических процессов порта: КП – качество погрузки, БП – безотказность погрузки, ВП – время погрузки, СГ – сохранность груза при погрузке и РП – репутация предприятия [3].

Для построения модели, адекватной реально функционирующей системе – грузовому порту – соблюдены основные рекомендации по определению уровня детализации модели, использовались методы верификации моделирующих компьютерных программ, а также методы повышения валидации и доверия к модели.

Верификация моделирующей компьютерной программы осуществлялась с использованием следующих методов: программа имитационной модели написана и отлажена по субмоделям; выполнялись прогоны модели с различными входными параметрами. В табл. 2 представлено изменение значений показателей (выборка для КП и БП) в зависимости от изменения входных параметров. В данном случае в качестве изменяемого входного параметра выступает период между поступлением заявок.

Таблица 2

Изменение значений показателей качества в зависимости от изменения входных параметров

Показатель	Значение, % (период между поступлением заявок 14-18 ч)	Значение, % (период между поступлением заявок 23-41 ч)	Наименее желаемое значение, %	Наиболее желаемое значение, %
КП(Асбест)	100	0	23	79
КП(Пилолес)	100	80	23	79
КП(Бумага)	100	100	23	79
КП(Металлопрокат)	100	100	23	79
КП(Общий)	100	70	23	79
БП(Асбест)	100	100	27	76
БП(Пилолес)	93	100	27	76
БП(Бумага)	87	66	27	76
БП(Металлопрокат)	100	100	27	76
БП(Общий)	95	91,5	27	76

С целью повышения доверия к модели: осуществлялась трассировка средствами программного продукта Arena 9.0; для доказательства того, что данные модели изменяются в правильном порядке, выполнялись прогоны имитационной модели при упрощенных допущениях; на основе собранных статистических данных определены распределения вероятностей факторов случайности модели с помощью Input Analyzer; построена анимационная схема модели, позволяющая просмотреть работу модели в динамике и выявить ошибки модели.

Для повышения валидации и доверия к модели использовались следующие методы:

1. Сбор информации и данных о работе системы из различных источников: проводились консультации со специалистами порта, осуществлялось наблюдение за работой порта и его сотрудников, изучалась литература, посвященная работе портов.

2. Регулярно осуществлялось взаимодействие с руководством порта для доработки модели.

3. Валидация выходных данных всей имитационной модели. Окончательная проверка адекватности имитационной модели подтверждается, если установлено, что её выходные данные идентичны выходным данным, которые можно ожидать от реальной системы. Для такой проверки использованы результаты моделирования и статистические данные о работе грузового порта за сентябрь 2009 года. В указанный период времени на территории порта функционировали все погрузчики и краны. Метеорологические факторы, такие как туман, ветер, ледостав на работу порта влияние не оказывали.

Сравнение статистических показателей работы порта за сентябрь 2009 года и показателей, полученных в результате моделирования, представлено в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение моделируемых и статистических показателей работы порта

Показатель	Данные модели	Статистические данные	Отклонение (%)
Общее количество полученных заявок, шт.	77	78	1,3
Количество заявок на погрузку асбеста, шт.	40	42	4,8
Количество заявок на погрузку бумаги, шт.	52	50	3,8
Количество заявок (шт.) на погрузку: швеллера, листового железа	12	13	7,7
	18	17	5,6
Количество заявок на погрузку леса	32	34	5,9
Общее количество отказов по заявкам	16	15	6,3
Объем отгруженных грузов (т)	157 446	162 000	2,8
Количество претензий (шт.)	4	4	0
Количество утерянного или испорченного асбеста (т)	0,700	0,650	7,1
Количество утерянной или испорченной бумаги (т)	0,850	0,900	5,6
Количество утерянного или испорченного металлопроката (т)	0,550	0,550	0
Количество утерянного или испорченного леса (т)	0,300	0,320	6,3
Количество поломок погрузочной техники	4	4	0

Также адекватность построенной имитационной модели реальному объекту проверена на основе использования критерия Стьюдента. Данная проверка показала, что полученные данные модели не противоречат эмпирическим данным, собранным в порту, на 2%-ом уровне значимости (для количества претензий и количества поломок погрузочной техники), 10%-ом уровне значимости (для величины объема отгруженных грузов) и 5%-ом уровне значимости (для остальных выходных данных). Результаты сравнения позволяют утверждать, что разработанная модель адекватна реальному экономическому объекту, т.к. отклонение данных, полученных при моделировании, от эмпирических данных составило от 0 до 7,1%.

Для планирования имитационных экспериментов воспользуемся полным факторным планом типа  $2^k$ , т.к. он является наиболее экономичной стратегией, с помощью которой можно измерять взаимодействие. Данная стратегия предполагает выбор двух уровней каждо-

го фактора, а затем проведение имитационных прогонов для каждой из  $2^k$  возможных комбинаций уровней факторов, называемых точками плана [101].

Проведем  $2^6$ - факторный эксперимент с построенной имитационной моделью. Введем шесть входных переменных ( $\Phi_1$  – Число единиц погрузочной техники (кранов);  $\Phi_2$  – Число единиц погрузочной техники (погрузчиков);  $\Phi_3$  – Число причалов порта;  $\Phi_4$  – Площадь складского комплекса грузового порта;  $\Phi_5$  – Интенсивность поступления заявок и  $\Phi_6$  – Норма выгрузки/погрузки грузов).

Необходимо получить начальную оценку влияния каждого фактора на отклики- показатели технологических процессов порта. Также необходимо определить, будут ли факторы взаимодействовать друг с другом, то есть будет ли эффект одного фактора зависеть от уровня другого фактора. Для того чтобы увидеть, как отклик реагирует на изменение факторов, будем поочередно фиксировать и изменять значения факторов [75]. Предлагается провести эксперимент с увеличением площади склада на 10%, увеличением интенсивности поступления заявок на 10%, т.е. уменьшением интервала времени между моментами прибытия заявок на 10%, увеличением нормы выгрузки/погрузки на 10%, увеличением числа кранов, погрузчиков и причалов на 1 единицу.

По результатам эксперимента можно рассчитать эффекты факторов для различных откликов. Рассмотрим сначала эффекты факторов для отклика «Качество погрузки». Главными эффектом фактора  $j$  является средняя величина изменения в отклике, обусловленная переходом фактора  $j$  с уровня «-» на уровень «+», в то время как остальные факторы остаются без изменений. Такая средняя величина берется для всех комбинаций уровней факторов.

Для выбранного нами факторного плана типа  $2^6$  главные эффекты фактора определяются следующим образом (табл. 4).

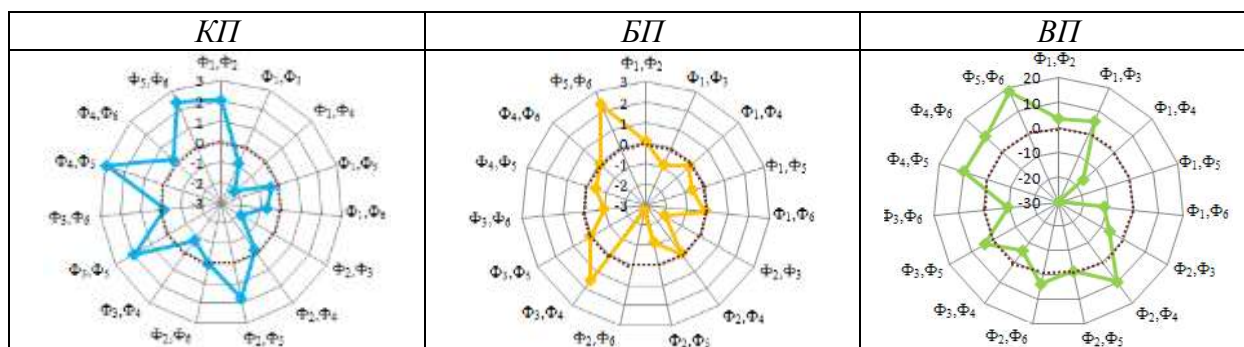
Таблица 4

Формулы для вычисления главных эффектов факторов

Фактор	Формула главного эффекта фактора	Точка плана ( $j$ )
$\Phi_1$	$e_1 = \sum_{i=2}^n \frac{2(R_i - R_{i-1})}{n}$	$i = 2, 4, 6, 8, \dots, 64$
$\Phi_2$	$e_2 = \sum_{i=3}^n \frac{2(R_i - R_{i-2})}{n}$	$i = 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 23, 24, 27, 28, 31, 32, 35, 36, 39, 40, 43, 44, 47, 48, 51, 52, 55, 56, 59, 60, 63, 64$
$\Phi_3$	$e_3 = \sum_{i=5}^n \frac{2(R_i - R_{i-4})}{n}$	$i = 5, 6, 7, 8, 13, 14, 15, 16, 21, 22, 23, 24, 29, 30, 31, 32, 37, 38, 39, 40, 45, 46, 47, 48, 53, 54, 55, 56, 61, 62, 63, 64$
$\Phi_4$	$e_4 = \sum_{i=9}^n \frac{2(R_i - R_{i-8})}{n}$	$i = 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64$
$\Phi_5$	$e_5 = \sum_{i=17}^n \frac{2(R_i - R_{i-16})}{n}$	$i = 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64$
$\Phi_6$	$e_6 = \sum_{i=33}^n \frac{2(R_i - R_{i-32})}{n}$	$i = 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64$

В табл. 4  $n = 64$  – общее количество комбинаций факторов (точек плана),  $R_i$  – отклик, соответствующий точке плана  $i$ . Определены главные эффекты всех факторов для различных откликов. Они представляют среднюю величину изменения в отклике, связанную с изменением отдельного фактора. Анализ полученных результатов позволил выявить существенные изменения показателей оценки деятельности грузового порта в зависимости от факторов.

Эффекты взаимодействия двух факторов  
для показателей технологических процессов порта



Таким же образом рассчитываются эффекты взаимодействия различных комбинаций факторов. Результаты вычислений представлены в виде диаграмм (табл. 5 – Эффекты взаимодействия двух факторов (выборка для КП, БП и ВП)). Разработанные диаграммы представляют зависимость показателя от влияния факторов, лучи диаграмм – собой комбинации взаимодействия факторов, пунктирной линией обозначено нулевое значение эффекта взаимодействия.

Принимая во внимание все полученные эффекты взаимодействия для различного числа факторов сравним комбинации факторов, оказывающие наибольшее положительное и отрицательное влияние на показатели в заданном случае. Можно сделать вывод, что наибольшее положительное влияние на показатель КП оказывает взаимодействие факторов  $\Phi_4$  и  $\Phi_5$ , на БП –  $\Phi_1$ , на ВП –  $\Phi_1$  и  $\Phi_5$ , на РП –  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ ,  $\Phi_4$  и  $\Phi_5$ , и на СГ – взаимодействие всех шести факторов. Наибольшее отрицательное влияние на показатели КП, БП, РП и СГ оказывает взаимодействие факторов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_3$ ,  $\Phi_4$ ,  $\Phi_5$  и  $\Phi_6$ , на ВП –  $\Phi_1$ ,  $\Phi_3$  и  $\Phi_5$ .

Для выбора определенного состояния факторов, позволяющего максимизировать эффект их взаимодействия, необходимо комплексно рассматривать результаты экспериментов. Так, вначале необходимо выбрать показатель, достижение увеличения или уменьшения значения которого является наиболее желаемым, а затем – рассматривать все остальные показатели и влияние на них выбранных факторов.

Таким образом, для исследования технологических процессов грузового порта построены следующие схемы: структурная схема технологических процессов грузового порта в символическом Q-схем, обобщенная и детальная схемы моделирующего алгоритма. Дана характеристика входной и выходной информации имитационной модели. Определены факторы случайности. Представлены полученные значения параметров вероятностных распределений для всех факторов случайности и обоснован выбор этих значений. Описаны основные и управляющие модули построенной модели. Модель проверена на адекватность реальному экономическому объекту методами верификации моделирующих компьютерных программ, а также методами повышения валидации и доверия к модели. Описана возможность и обоснована необходимость осуществления планирования проведения экспериментов с построенной имитационной моделью с помощью факторных планов с целью выявления влияния определенных факторов, присутствующих в осуществлении процессов в грузовом порту, на результирующие значения показателей качества логистического обслуживания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика С / В. Кельтон, А. Лоу. СПб.: Питер; Киев: Изд. группа ВНУ, 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.

тационного моделирования / Ханова А.А., Григорьева И.О.; правообладатель Астр. гос. техн. ун-т. № 2008610791; дата поступл. 28.02.2008; дата регистр. 16.04.2008.

3. . Оценка качества логистического обслуживания грузового порта с использованием имитационного моделирования / А.А. Ханова, И.О. Григорьева // Датчики и системы. 2009. № 5. С. 11-15.

**Проталинский Олег Мирославович –**

доктор технических наук, профессор проректор по информатизации, заведующий кафедры «Прикладная информатика в экономике» Астраханского государственного технического университета

**Ханова Анна Алексеевна –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная информатика в экономике» Астраханского государственного технического университета

**Бондарева Ирина Олеговна –**

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Прикладная информатика в экономике» Астраханского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 07.10.10, принята к опубликованию 25.10.10*



## УПРАВЛЕНИЕ В КЛАСТЕРНЫХ СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

---

УДК 658.5

**И.К. Гевлич, А.А. Захаров, И.М. Ткаченко**

### МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ

*В работе проведено сравнение различных моделей управления с предлагаемой авторами моделью системы управления развитием образовательного учреждения с учетом анализа взаимосвязей различных элементов.*

Управление, модель, образовательное учреждение

**I.K. Gevlich, A.A. Zakharov, I.M. Tkachenko**

### MODEL OF THE CONTROL SYSTEM OF PROGRESS OF GENERAL EDUCATIONAL ESTABLISHMENT

*In work comparison of various models of management with model of a control system offered by authors progress of educational establishment in view of the analysis of interrelations of various elements is lead.*

Management, model, educational establishment

Успех развития любой социально-экономической организации во многом зависит от умения управленческого персонала планировать и прогнозировать будущие результаты. В основу построения предложенной авторами модели системы управления развитием общеобразовательного учреждения (в дальнейшем – СУР ОУ) как социально-экономической организации положена структура модели делового совершенства EFMQ с учетом основных элементов Цикла Э. Деминга и японского подхода [1].

Предлагаемая модель, на первый взгляд, сохраняет основные элементы существующих моделей (см. таблицу). Однако при детальном сопоставлении можно отметить и их принципиальные отличия. Конечно, цикл Э. Деминга дает слишком общий план, что затрудняет сравнение, особенно в области отражения результатов, т.к. «DO», «CHECK», «ACT» относятся к процессным явлениям, а результаты подразумеваются, но они скрыты, их интерпретация не представлена, хотя они, по-видимому, определяют «Корректировку».

## Модели управления

Цикл Э. Деминга	Модель совершенства EFQM			РФ	Японская премия качества		Модель СУР ОУ		
PLAN - план	Возможности	Лидирующая роль руководства	100	100	Лидерство и принятие решений	120	Ресурсы	Лидирующая роль руководства и коллегиальность принятия решений	100
					Социальная ответ- ственность в управ- лении	50			
		Политика и стратегия	80	100	Разработка и реали- зация стратегии	60		Политика и стратегия	80
		Управление персоналом	90	120	Обучение и развитие персонала	100		Основной и другой персонал	120
		Партнерство и ресурсы	90	100	Понимание клиентов и рынка и работа с ними	100		Внешние ресурсы	60
DO - действие		Управление процессами	140	130	Процесс создания ценностей	120	Образовательный процесс	140	
CHECK - контроль	Результаты	Удовлетворенность потребителей	200	180	Результаты работы	400	Результаты	Удовлетворенность учащихся	90
		Удовлетворенность персонала	90	90				Удовлетворенность родителей	70
		Влияние на общества	60	60				Удовлетворенность персонала	80
		Результаты работы	150	120				Влияние на социум	40
Информационный менеджмент	50				Анализ и корректировка	60			
ACT - коррек- тивировка									

При близости EFQM модели и японской премии качества к предлагаемой авторами модели требуется отметить, что представляемая модель содержит ряд новых элементов и конкретизирована на широкий спектр результативных составляющих.

Сравнение моделей целесообразно провести на основе анализа связей элементов внутри предлагаемой модели, обращая при необходимости к интерпретации понятийного аппарата других моделей в плане адаптации к деятельности ОУ.

На рисунке показаны основные элементы и их взаимосвязь в данной модели. Вид и толщина стрелок, соединяющих элементы системы, определяют значимость связи и направление действия. Пунктирной линией выделены элементы входящие соответственно в модуль «Ресурсы» и «Результаты».

Опираясь на ресурсный и процессный подходы, как наиболее эффективные и практикоориентированные на данном этапе развития образования, из модуля «Возможности» модели EFQM элемент «Управление процессом» выделен в отдельный модуль «Образовательный процесс», а сам модуль переименован в «Ресурсы». Эффективное управление, согласно циклу Э. Деминга, базируется на анализе полученных результатов, в связи с чем в структуру СУР ОУ добавлен модуль «Анализ и корректировка», который позволит на основе методов математической статистики с использованием компьютерного оборудования и программного обеспечения ускорить процесс анализа полученных результатов самооценки и повысить объективность принимаемых управленческих решений. Каждый модуль СУР ОУ состоит из элементов (критериев), каждому из которых поставлено в соответствие максимальное количество баллов, в зависимости от значимости данного блока в модуле.



Структура взаимосвязей в СУР ОУ

В модуле «Ресурсы» центральным элементом является «Основной и другой персонал» ОУ. Современный уровень условий проведения ОП обеспечивается размером ресурсных вложений, однако непосредственное влияние на уровень образования учащихся, являющийся основным результатом деятельности ОУ, оказывает основной персонал, именно этим обосновываются максимальное количество баллов по данному блоку и толщина стрелок, соединяющих элемент «Основной и другой персонал» модуля «Ресурсы» с модулем «Образовательный процесс». Данный факт подтверждают выводы различных международных исследований [2, 3].

Элемент «Лидирующая роль руководства» дополнен «...и коллегиальность принятия решений». Данный блок соединяет главенство руководителя в управлении и разделение ответственности за принятое решение с коллективом работников, обеспечивает снижение риска неисполнения или недолжное исполнение принятого решения, способствуя получению максимального синергетического эффекта.

Разработка внутришкольного документа, определяющего политику и стратегию в области качества, соединяющего в процессе создания лидерство руководителя и творчество коллектива, является важным критерием успешности развития организации. Именно поэтому стрелка, соединяющая элементы «Политика и стратегия» и «Основной и другой персонал», двусторонняя, показывающая необходимость единства целей руководства и основного коллектива.

Разделение элемента «Партнерство и ресурсы» модели EFMQ на два элемента «Внешние ресурсы» и «Партнерство» обусловлено спецификой работы ОУ. Под внешними ресурсами здесь понимается материально-финансовое обеспечение, которое выделяется в рамках бюджетной и внебюджетной сметы учреждения.

Партнерство ОУ рассматривается как взаимодействие с другими социальными организациями и государственными структурами власти, в функционал которых входят мероприятия, связанные с формированием ключевых компетентностей учащихся. Повышение значимости данного элемента модуля «Ресурсы» определено отсутствием в штатном расписании ОУ должности специалиста этого профиля или низкой ставки заработной платы данной штатной единицы. Однако влияние партнеров на качество образования конкретного обучающегося латентно и измерить его количественно достаточно сложно, этим обстоятельством определены вид и толщина стрелки на рисунке, соединяющей элемент «Партнерство»

с модулем «Образовательный процесс». Аналогичная стрелка соединяет данный элемент с элементом «Политика и стратегия», так как данные организации являются внешними по отношению к ОУ и директивные документы ОУ на них не распространяются.

В модуле «Результаты» СУР ОУ центральным элементом является блок «Образовательный уровень» как основной результат деятельности ОУ для всех потребителей образовательных услуг. Внутренняя структура данного блока и алгоритм измерения образовательного уровня учащихся подробно рассмотрен в [4].

В отличие от модели EFQM элемент «Удовлетворенность потребителей» разделена на два элемента «Удовлетворенность учащихся» и «Удовлетворенность родителей», так как учащиеся непосредственно получают образовательную услугу в ходе образовательного процесса (ОП), а удовлетворенность родителей, как известно из управленческой и образовательной практики, зависит от мотивации к обучению их детей, степени взаимопонимания с работниками, классным руководителем и администрацией ОУ, удовлетворенности организацией ОП и образовательных результатов учащихся. Организация ОП в равной мере влияет на удовлетворенность всех его участников и наоборот, поэтому стрелки, соединяющие элементы «Удовлетворенность учащихся», «Удовлетворенность родителей», «Удовлетворенность работников» модулем «Образовательный процесс», имеют одинаковую толщину и двусторонние. Влияние элемента «Образовательный уровень» как основного результата деятельности ОУ на участников ОП различно. Толщина стрелки между элементом «Образовательный уровень» и элементами «Удовлетворенность учащихся» отличается от остальных участников ОП на основании того, что образовательные результаты более мотивационно значимы для учащихся. Удовлетворенность основных работников также зависит от получаемых образовательных результатов учащихся и взаимопонимания родителей. Она влияет на отношение с учащимися через проведение учебных и внеучебных занятий. Односторонняя тонкая стрелка, связывающая элементы «Удовлетворенность работников» и «Образовательный уровень», показывает, что образовательный уровень измеряется непосредственно у обучающегося, а педагог, взаимодействуя с учащимся в ходе образовательного процесса, формирует у него определенные компетенции.

Элемент «Влияние на социум» размещен за элементом «Образовательный уровень», потому что напрямую только образовательные результаты выпускников ОУ влияют на общество, так как качество жизни во многом зависит от образовательного уровня населения.

Эффективность работы организации определяется как соотношение полученного результата к вложенным ресурсам

$$F(V, L, D, C) = L/V = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m L_{ij}}{\sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^w V_{xy}} = \begin{cases} < 1, L > V \\ = 1, L = V, \text{ при } C \rightarrow \max, D \rightarrow \max, \\ > 1, L < V \end{cases} \quad (1)$$

где  $L$  – итоговый балл, полученный по блоку «Результаты»;  $V$  – итоговый балл, полученный по блоку «Ресурсы»;  $C$  – баллы, полученные за образовательный процесс;  $D$  – баллы, полученные за анализ и корректировку;  $L_{xy}$  – баллы, полученные по  $j$ -му показателю  $i$ -го критерия (элемента) блока «Результаты»;  $V_{ij}$  – баллы, полученные по  $y$ -му показателю  $x$ -го критерия (элемента) блока «Ресурсы»;  $n, s$  – количество критериев (элементов) блоков «Результаты» и «Ресурсы» соответственно;  $m, w$  – количество показателей по критериям (элементам) блоков «Результаты» и «Ресурсы» соответственно.

Если показатель эффективности  $F$  меньше 1, значит, вложенные ресурсы используются неоптимально, так как фактические результаты меньше планируемых при данном уровне вложения ресурсов. В случае превышения показателя эффективности  $F$  значения 1 означает, что полученный результат больше планируемого, следовательно, задействованы латентные ресурсы. В качестве данных ресурсов могут выступать внутренние ресурсы основного персонала, однако длительное использование данных ресурсов без компенсационных мероприятий приводит к профессиональному «выгоранию» педагогов. Оптимальным считается управ-

ление при показателе эффективности, равном 1, то есть объем вложенных ресурсов соответствует полученным результатам.

Предлагаемая авторами модель СУР ОУ позволяет проводить самооценку эффективности образовательной деятельности основных работников ОУ в целом для прогнозирования и планирования траектории дальнейшего развития организации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов Д. Сравнительный анализ мировых премий по качеству / Д. Маслов // Стандарты и Качество. 2005. №5. С. 25-27 с.
2. Ковалева Г.С. Отчет о результатах проведения в России международного исследования PISA-2003 Центра оценки качества образования Института содержания и методов обучения Российской академии образования. URL: [www.centeroko.ru](http://www.centeroko.ru) (дата посещения: 24.06.2009).
3. Основные результаты международного исследования качества математического и естественнонаучного образования TIMSS-2003. М.: Центр оценки качества образования ИСМО РАО, 2004. 101 с.
4. Гевлич И.К. Система менеджмента качества образования общеобразовательного учреждения / И.К. Гевлич, А.А. Захаров // Проблемы качества образования в современном обществе: сб. ст. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2009. С. 49-53.

**Гевлич Инна Кимовна** –

аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

**Захаров Александр Александрович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

УДК 681.3.07

**А.А. Большаков, В.В. Шатохин**

#### **ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ**

*Предложена методика сравнительной оценки результативности обучения при традиционном подходе и с использованием автоматизированной обучающей экспертной системы, особенностью которой является учет неоднородности групп обучаемых по уровню знаний, а также их психофизиологические характеристики.*

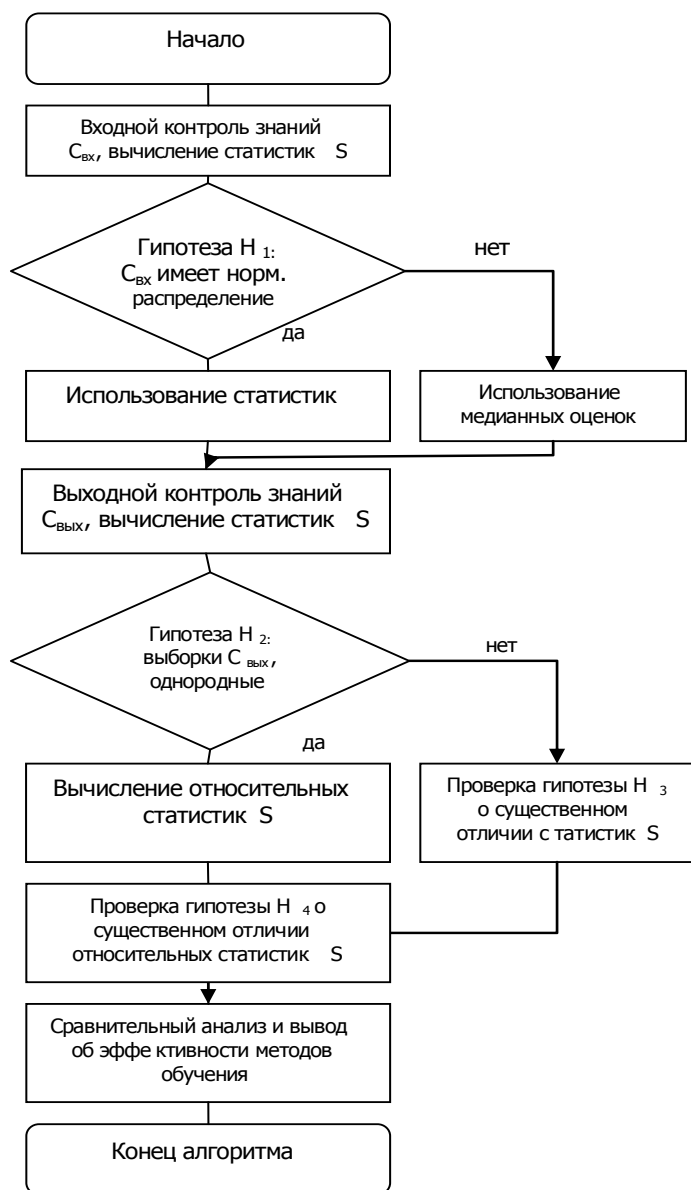
Оценки результативности обучения, психофизиологические характеристики, экспертная система

A.A. Bolshakov, V.V. Shatohin

### ESTIMATION OF PRODUCTIVITY OF FUNCTIONING OF THE AUTOMATED TRAINING EXPERT SYSTEM

*The technique of a comparative estimation of productivity of training is offered at the traditional approach and with use of the automated training expert system which feature is the account of heterogeneity of groups of trainees on level of knowledge, and also their psychophysiological characteristics.*

Estimation of productivity of training, psychophysiological characteristics, expert system



Алгоритм оценки эффективности обучения

Обучение является одним из видов интеллектуальной деятельности и неотъемлемым атрибутом организационно-технических и организационных систем. Это обусловлено наличием человеческого фактора, т.е. человека как элемента этих систем, выполняющего определенные функции, ему на протяжении всего существования человечества отводилась особая роль, так как от успеха его организации зависело многое: степень преемственности при передаче опыта и знаний, формирование у будущих поколений стремления к познанию окружающего мира, его преобразованию.

Результативность обучения существенно зависит от степени учета индивидуальных особенностей обучаемого, от его психофизиологических характеристик (ПФХ). В общем случае количество ПФХ [1] человека-оператора достаточно велико. Например, по наиболее информативному каналу восприятия информации различают «логиков», «аудиалов», «кинестиков», «визуалов»; по типу мышления – «дедуктивный» и «индуктивный»; по скорости принятия решения – «рефлексивный» и «импульсивный» и т.д.

Для использования ПФХ и возможностей современных информационных технологий нами предложена автоматизированная обучающая экспертная систем (АОЭС) [2], осо-

бенностью которой является управление процессом обучения по возмущению, т.е. ПФХ, и отклонению (от заданного уровня знаний).

Представляет интерес сравнение результативности при традиционном обучении и с использованием АОЭС. Для этого вариативная часть этой системы заполнена информацией по курсу «Паскаль». Ниже описываются методика и результаты сравнительной оценки результативности обучения для этих двух методов.

Таблица 1

## Результаты обработки анкеты по определению ВРС

N	A	Л	В	К	N	A	Л	В	К
1	11	13	8	18	11	12	14	16	8
2	15	13	11	11	12	18	12	13	7
3	10	11	15	15	13	16	9	12	11
4	14	9	11	16	14	13	9	12	16
5	13	8	16	13	15	8	11	15	16
6	12	11	12	15	16	9	11	14	16
7	11	8	11	20	17	7	16	11	16
8	7	12	11	20	18	12	9	15	14
9	10	13	13	14	19	11	11	10	18
10	12	12	10	16	20	11	12	10	14
					21	9	14	13	14

Таблица 2

## Статистический анализ результатов обучения

Характеристика	Традиционная методика		Автоматизированное обучение	
	среднее, $S^1$	с.к.о., $S^2$	среднее, $S^1$	с.к.о., $S^2$
Входной КЗ	7,1	1,85	5,9	2,05
Выходной КЗ	8,4	1,60	7,9	1,29
Относительное изменение, %	15,5	13,5	25,3	35,6

Для определения результативности использования автоматизированной обучающей экспертной системы проведены эксперименты по обучению студентов СГТУ по дисциплине «Язык программирования Паскаль».

В частности, в экспериментах принимали участие студенты 1-го курса специальности «Робототехнические системы и комплексы» Саратовского государственного технического университета. В эксперименте участвовали две группы студентов, которые обучались по разным методикам: группа РТС-11 – по традиционной методике, группа РТС-12 – с применением разработанной АОС. Целью обучения являлось достижение максимального уровня знаний при заданном времени обучения. Алгоритм предложенной методики сравнительной оценки эффективности различных методик представлен на рисунке.

Согласно этой методике, перед началом обучения проведен входной контроль знаний студентов обеих групп. Уровень выходных знаний  $S_0$  определялся на итоговом экзамене. Распределение оценок студентов согласно проверенной статистической гипотезе подчиняется нормальному закону, поэтому в оценке эффекта от внедрения ЭС используются такие критерии, как среднее значение и среднеквадратическое отклонение.

Для доказательства гипотезы о нормальном распределении оценки студентов и расчета статистических показателей использовалась программа, написанная в среде MathCad 6.0.

По результатам входного контроля знаний средняя оценка в группе  $S_i$ , обучаемой по традиционной методике (7,1), выше, чем в группе автоматизированного обучения (5,9). Кроме этого, в последней группе степень «разброса» уровня знаний, оцениваемая с помощью

среднеквадратического отклонения, выше, поэтому используется относительное приращение среднего значения и относительное изменение среднеквадратического отклонения.

$$S_{i,o} = \{S_{i,o}^1, S_{i,o}^2\}; S_{i,o}^1 = 1/n \sum_{j=1}^n C_{i,o}^j; S_{i,o}^2 = (\sum_{j=1}^n (C_{i,o}^j - S_{i,o}^1)^2 / (n-1))^{0,5},$$

где  $C_{i,o}^j$  – оценка j-го студента при входном и выходном контроле знаний.

На первом этапе с помощью метода экспертных оценок выявлен состав показателей, входящих в модуль определения ПФХ. При этом установлено, что первая группа в основном состоит из К – «кинетиков», гораздо меньше представлены другие типы (А – «аудиалы» – 3, В – «визуалы» – 3, практически ни одного Л – «логика»). Во второй группе преобладали в основном «логики», а также небольшая часть – «визуалы».

Результаты анкетного опроса тестируемой группы студентов (табл. 1) обработаны с помощью модуля определения ПФХ АОЭС.

На втором этапе зафиксированы процедуры входного и выходного контроля знаний. Затем с помощью таких процедур извлечения знаний, как анкетирование, собеседование и др., получена необходимая информация о методике обучения для эвристического достижения максимума критерия с учетом ПФХ. Результаты входного и выходного контроля знаний при проверке гипотезы  $H_3$  представлены в табл. 2. Их анализ позволяет сделать вывод об эффективности использования АОС, т.к. «прирост» уровня знаний составил 25,3%, тогда как для традиционной методики он равен лишь 15,5%. Кроме этого, использование автоматизированного обучения снизило «разброс» в уровне знаний на 35,6%, тогда как при традиционной методике этот показатель равен 13,5%.

Дальнейшая эксплуатация АОС в вузах также показала ее более высокую эффективность по сравнению с традиционными подходами к обучению информатике и программированию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков А.А. Идентификация психофизиологических характеристик операторов / А.А. Большаков, В.В. Шатохин // Вестник ТГТУ. 1999. Т 5. №3. С.359-363.
2. Автоматизированная обучающая экспертная система (АОЭС) / А. А. Большаков, В. В. Шатохин, В. В. Мусатов, С. С. Буйлов; Свидетельство Роспатента об офиц. регистр. программы для ЭВМ. № 2003611710. – 2003.
3. Большаков А.А. Управление образовательным процессом на основе автоматизированных комбинированных обучающих систем / А.А. Большаков, О.Н. Долина, В.В. Шатохин // Вестник СГТУ. 2008. №3(35). Вып. 2. С. 54-62.

#### **Большаков Александр Афанасьевич –**

доктор технических наук, декан факультета электронной техники и приборостроения, заведующий кафедрой «Системотехника», профессор кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

#### **Шатохин Василий Викторович –**

аспирант кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 06.10.10, принята к опубликованию 25.10.10*



УДК 681.3:378:004.89:004.588

**А.А. Большаков, А.Ю. Маркелов**

### **КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ПО КУРСУ «НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ»**

*Предложен метод контроля знаний обучающихся в интеллектуальной обучающей системе на основе H-диаграмм и использования нечеткой логики, описаны различия компьютерного тестирования теоретических и практических знаний.*

Контроль знаний, интеллектуальная обучающая система, нечеткая логика

**A.A. Bolshakov, A.Yu. Markelov**

### **CONTROL OF KNOWLEDGE IN INTELLECTUAL TRAINING SYSTEM AT THE RATE «RELIABILITY OF SYSTEMS OF AUTOMATION»**

*The quality monitoring of knowledge trained in intellectual training system on the basis of H-diagrams and use of indistinct logic is offered, distinctions of computer testing of theoretical and practical knowledge are described.*

Control of knowledge, intellectual training system, the indistinct logic

В настоящее время в образовательной среде наблюдается стремительный рост автоматизации обучающего процесса различных учебных заведений. Совершенствование процесса обучения требует разработки новых методов контроля знаний. Существует относительно большое количество разнообразных методов проведения контроля и оценки знаний как при традиционном, так и при компьютерном обучении.

Традиционные методы компьютерного контроля знаний, к которым относится тестовая система, имеет ряд достоинств по сравнению с «классическими» устными и письменными методами: 1) быстрота проверки большого объема информации и знаний; 2) широта представления информации; 3) оценка знаний большого количества студентов; 4) прозрачность системы; 5) удобство статистической обработки результатов; 6) поддержка работы преподавателей.

В такой системе контроля знаний имеются свои недостатки: 1) наличие готового ответа не позволяет оценить способности студента самостоятельно мыслить и формулировать ответ; 2) невозможность выявления наличия дополнительных и самостоятельно приобретенных знаний; 3) вероятность угадывания правильных ответов; 4) высококачественная подготовка тестовых заданий – творческий и весьма трудоемкий процесс.

Из перечисленных выше недостатков следует, что для успешного применения тестовой системы контроля знаний в интеллектуальной обучающей системе необходимо использовать два уровня контроля: 1) теоретический контроль знаний – оценивание знаний пройденного лекционного материала; 2) практический контроль – проверка практических навыков решения задач.

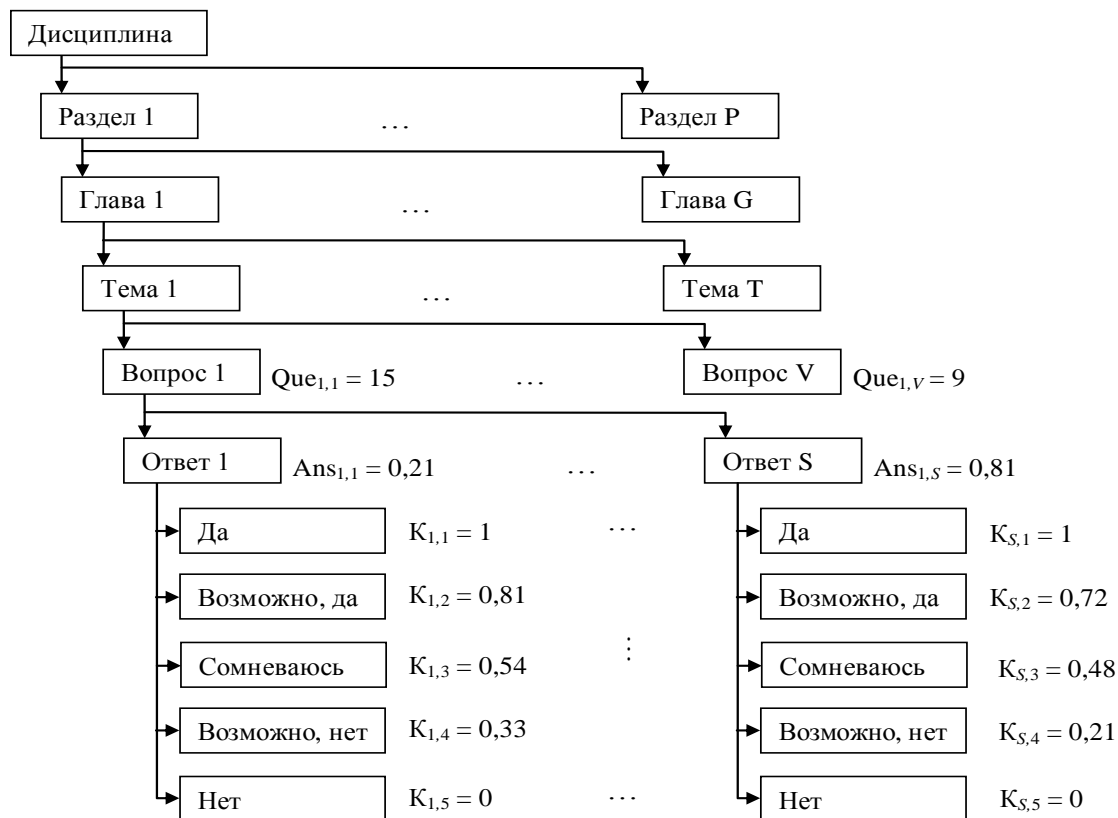


Рис. 1. H-диаграмма системы контроля теоретических знаний

Для проверки знаний по изученному теоретическому материалу в системе предлагается использовать усовершенствованную тестовую систему. Усовершенствование системы тестирования заключается во введении нечеткой логики. В традиционном тестировании используются два ответа [да, нет] на вопрос с весовыми коэффициентами [0, 1]. При использовании модифицированной системы для каждого вопроса предлагается несколько вариантов ответа с определенными весовыми коэффициентами. При этом для любого варианта ответа (правильного или неправильного) задается степень уверенности [да; возможно, да; сомневаюсь; возможно, нет; нет] с коэффициентами [1,0; 0,72; 0,48; 0,21; 0] или [1,0; 0,6; 0,4; 0,3; 0].

Преподаватель при формировании тестового задания по теме определяет вес (максимальный балл), который получит обучаемый при правильном ответе с абсолютной уверенностью. Далее записывается ответ и ему присваивается значение коэффициента правильности, а затем каждой степени уверенности задается отдельный коэффициент. При этом у разных ответов на поставленный вопрос могут быть различные коэффициенты степени уверенности (рис. 1).

Балл за выбранный ответ с определенной степенью уверенности на поставленный вопрос получается перемножением веса вопроса  $Que \in [0, \dots, 15]$ , коэффициента правильности ответа  $Ans \in [0, \dots, 1]$  и коэффициента степени уверенности  $K \in [0, \dots, 1]$ .

Система контроля знаний поддерживает различные типы вопросов:

- простые, предполагающие ответ типа «Истина/Ложь»;
- наиболее часто встречающиеся в тестах вопросы множественного выбора:
  - один из нескольких с указанием степени уверенности, например [да; возможно, да; сомневаюсь; возможно, нет; нет];
  - несколько из нескольких, по аналогии с предыдущим вариантом;
- вопросы с вводом с клавиатуры;
- выбор порядка следования вариантов ответов.

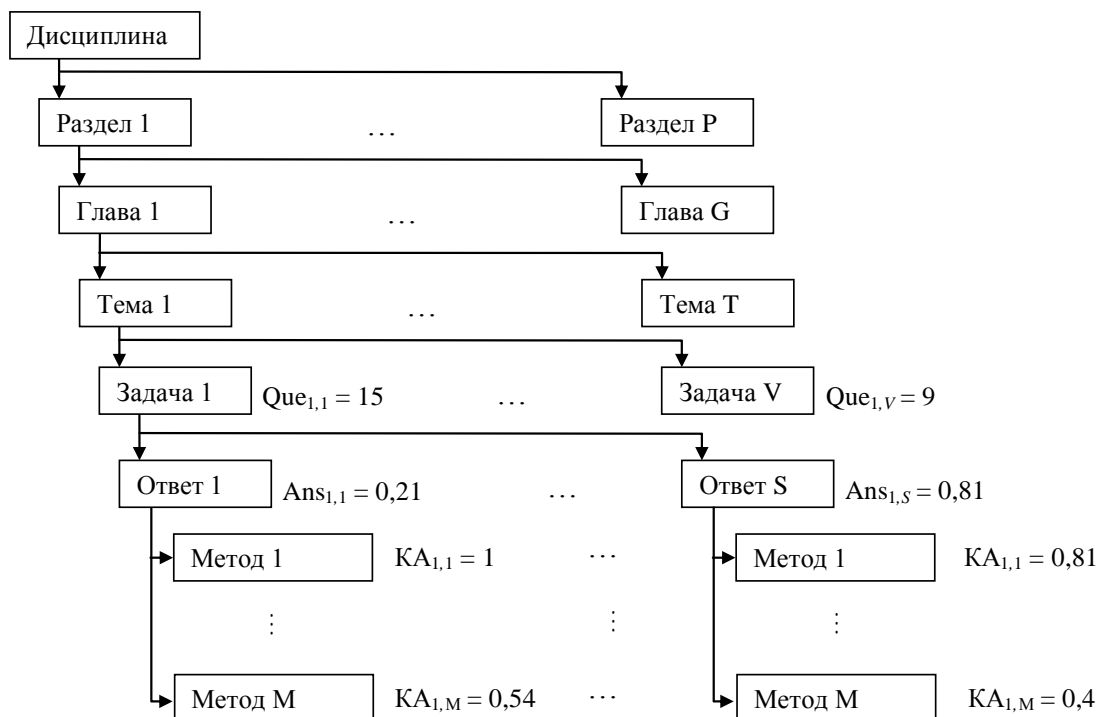


Рис. 2. Н-диаграмма системы контроля практических знаний

Для практической проверки знаний по изученному материалу, например по дисциплине «Надежность систем автоматизации», в системе предлагается использовать усовершенствованную тестовую систему. Идея заключается во введении второго (подтверждающего) уровня при решении поставленной задачи, который предоставляет информацию о наличии определенных теоретических знаний и навыков их применения обучаемым. Таким способом достигается уменьшение зависимости ошибки вычислений относительно алгоритма решения, что способствует незначительному снижению оценки за ошибку в вычислениях. В традиционном тестировании практических знаний используются два ответа [да, нет] на вопрос с весовыми коэффициентами  $[0, 1]$ , либо выбор правильного ответа или ввод с клавиатуры. При применении модифицированной системы для каждой задачи предлагается несколько вариантов выбора ответа, либо ввод с клавиатуры. При этом для любого варианта ответа (независимо от правильности) выбирается один из представленных алгоритмов возможного решения поставленной задачи.

Преподаватель при формировании практического тестового задания по определенной теме задает вес (максимальный балл), который получит обучаемый при правильном ответе с правильным алгоритмом решения задачи. Далее записываются ответы и присваиваются значения коэффициента правильности, а затем каждому методу решения задачи задается отдельный коэффициент. При этом у разных ответов и алгоритмов решения поставленной задачи могут быть различные или одинаковые коэффициенты отражения правильности решения (рис. 2).

Балл или оценка за решение задачи получается перемножением веса практического вопроса  $Que \in [0, \dots, 15]$  и отношения суммы коэффициента правильности ответа  $Ans$ , умноженного на поправочный коэффициент  $Z_1$ , и коэффициента правильности выбора алгоритма решения  $KA$ , умноженного на поправочный коэффициент  $Z_2$ , к сумме поправочных коэффициентов  $Z_1$  и  $Z_2$ . Следовательно,  $Z_1 * Ans + Z_2 * KA \leq Z_1 + Z_2$ , где коэффициенты  $Z_1, Z_2 \in [0, \dots, \infty]$  – поправочные коэффициенты, показывающие приоритет алгоритма решения

над арифметическими операциями, а оставшиеся коэффициенты принимают следующие значения  $A_{ns} \in [0, \dots, 1]$ ,  $K_A \in [0, \dots, 1]$ .

Благодаря контролю знаний между обучающей системой и объектом обучения устанавливается «обратная связь», позволяющая оценивать динамику усвоения не только теоретического учебного материала, но и умение решать практические задачи – действительный уровень владения системой знаний. На основе анализа таких данных вносятся соответствующие корректировки в организацию процесса обучения для устранения неудовлетворительного уровня знаний и умений.

**Большаков Александр Афанасьевич –**

доктор технических наук, декан факультета электронной техники и приборостроения, заведующий кафедрой «Системотехника», профессор кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

**Маркелов Александр Юрьевич –**

аспирант кафедры «Системы искусственного интеллекта» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 05.10.10, принята к опубликованию 28.10.10*

УДК 378: 519.1

**О.Н. Долинина, В.В. Печенкин, В.В. Тарасова, П.П. Шацких**

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ГРАВИТАЦИОННЫЙ «FORCE-DIRECTED» МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ УКЛАДКИ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

*В работе предложен модифицированный гравитационный «force-directed» метод визуализации динамической социальной сети с локальными ограничениями с учетом центральности ее акторов, который использован для построения социальной сети образовательной организации.*

Социальная сеть, локальные ограничения, force-directed методы, визуализация графа, центральность, образовательная организация

**O.N. Dolinina, V.V. Pechenkin, V.V. Tarasova, P.P. Shatskih**

**MODIFIED GRAVITATIONAL FORCE-DIRECTED METHOD OF DYNAMIC LAYOUT OF EDUCATIONAL ORGANIZATION SOCIAL NETWORK**

*Modified gravitational force-directed method for visualization of dynamic social network with local constraints using actors' centrality is described in the article, which is used for development of educational organization social network.*

Social network, local constraint, force-directed methods, graph visualization, centrality, educational organization

В настоящее время широко применяют математический аппарат социальных сетей и сетевого анализа для эффективного управления организацией. Высшее образовательное заведение с этой точки зрения представляет собой сложный объект управления, состоящий из большого числа взаимосвязанных подразделений, при этом для повышения эффективности управления, в т.ч. различными формами самостоятельной работы студентов, требуется учитывать отношения между различными группами акторов, то есть отношения вида «студент-студент», «студент-преподаватель», «преподаватель-преподаватель». Руководителю такой организации, а также руководителям ее подразделений, требуется механизм, позволяющий эффективно управлять учебным процессом, то есть принимать управленческие решения, основываясь на анализе отношений внутри коллектива. Исследование социальной сети образовательного учреждения позволяет анализировать взаимодействие между всеми участниками образовательного процесса, а также распространение потоков информации, выявлять ключевые фигуры в структуре такой сети, моделировать управляющие воздействия.

Визуальное восприятие социальной сети является одним из факторов сетевого анализа [1], поскольку позволяет наглядно отразить структуру организации. Основной задачей в этом случае становится построение такой укладки [2] сети, которая позволяла бы продемонстрировать те особенности ее структуры, которые принципиально важны для принятия управленческого решения. Так, с точки зрения анализа отношений в студенческом коллективе построение социальной сети и последующий сетевой анализ позволяют выделить неформальных лидеров, эффективнее формировать подгруппы для выполнения студенческих проектов. Анализ отношений между преподавателем и студентами позволяет проследить динамику общения, определить, насколько она меняется в периоды, связанные с контролем знаний (сессия, промежуточная аттестация). Анализ отношений внутри рабочего коллектива позволяет найти слабые места в его структуре, функционально «перегруженных» акторов, определить неформальных лидеров и тех, кто практически не участвует в рабочих процессах, проследить передвижение потоков информации, моделировать управленческие воздействия (например, как перераспределяются роли в коллективе при увольнении определенного сотрудника).

При построении укладки в некотором пространстве устанавливают ограничения на итоговое изображение графа (сети). Обычно ограничения определяются эстетическими критериями и изобразительным соглашением, выбранными для данной модели. Однако для выделения семантических особенностей графа или сети, определяемых конкретной предметной областью, необходимо также учитывать локальные ограничения на итоговое изображение.

Так, при моделировании социальной сети образовательного учреждения необходимо рассматривать ее как динамическую систему, структура которой постоянно меняется за счет изменения интенсивности взаимодействия участников сети, а также удаления и добавления новых. Помимо этого, необходимо выделять в структуре сети как акторов с высокой степенью значимости, так и явных «аутсайдеров», прослеживать динамику изменения степени их значимости. Для определения этого параметра в социальной сети используют понятие центральности [3]. В нашей работе для сети, характеризующей отношения типа «студент-студент» и «преподаватель-студент», будем использовать индекс центральности по степени, согласно которому центральность выше у тех акторов, которые напрямую связаны с большим количеством других, поскольку в этом случае наиболее важны прямые связи между акторами:

$$c^{degree}(v_i) = 100 d(v_i) / d_{max}, \quad (1)$$

где  $d(v_i)$  – степень  $i$ -й вершины;  $d_{max}$  – максимальная степень вершины в графе (сети).

Для отношений типа «преподаватель-преподаватель» будем использовать индекс центральности по близости (минимальности расстояния в сети), поскольку эта характеристика является глобальной и позволяет учесть влияние на актора всех, с кем он связан как непосредственно, так и косвенно:

$$c^{close}(v_i) = \left[ \sum_{j=1}^N D(v_i, v_j) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $N$  – количество акторов в сети;  $D(v_i, v_j)$  – кратчайший путь из вершины  $v_i$  в  $v_j$ .

На рис. 1 наибольший индекс центральности по степени – у вершины с номером 7, а по близости – у вершины с номером 8.

Каждому ребру между вершинами  $v_i$  и  $v_j$  назначим некоторый весовой коэффициент  $w_{ij}$ , соответствующий интенсивности взаимодействия между акторами сети, а каждой вершине  $v_i$  – вес  $w_i$ , соответствующий ее центральности.

Для того, чтобы отразить семантические особенности социальной сети образовательной организации, представленные выше, используем понятие локального ограничения по центральности:

$$O^{ctr} = \{O_{k_1}^{ctr}, O_{k_2}^{ctr}, \dots, O_{k_{max}}^{ctr}\}, O_{k_j}^{ctr} = \{W_{k_j}, \mu(k_j)\}, \quad (3)$$

где  $k_j \in K, j=1, \dots, k_{max}$ ;  $K$  – множество уровней центральности,  $W_{k_j} \in W$ ;  $W$  – множество всех взвешенных вершин сети;  $W_{k_j}$  – множество взвешенных вершин, относящихся к уровню центральности  $k_j$ , при этом  $\forall w_i \in W_{k_j}$  однозначно соответствует уровень  $k_j$ , если выполняется условие  $(i-1)/k_{max} \leq w_{k_j} < i/k_{max}$ . Функция  $\mu(k_j)$  определяет геометрическую область, в которой могут быть размещены вершины из множества  $W_{k_j}$ .

Таким образом, построение социальной сети с локальным ограничением по центральности позволяет визуализировать управляющие иерархии за счет отображения вершин на соответствующих уровнях центральности. Пример графа с представленным выше ограничением показан на рис. 2, где одним цветом выделены вершины, которые относятся к одному уровню центральности.

Задача визуализации динамической сети сводится к построению последовательности укладок  $L_i$  для каждого момента времени  $t_i \in T, t_i = 1, \dots, \infty$ :

$$\{L_0, L_1, \dots, L_i, \dots, L_n\}, i = 0, \dots, n. \quad (4)$$

Для построения укладок динамической социальной сети с локальным ограничением по центральности будем использовать так называемый «force-directed» или «силовой» подход, выбор которого обусловлен тем, что полученные с его помощью укладки максимально удовлетворяют основным эстетическим критериям, кроме того, легко адаптируются к локальным ограничениям, определенным в зависимости от специфики области применения. Краткий обзор «force-directed» методов визуализации графов приведен в [2].

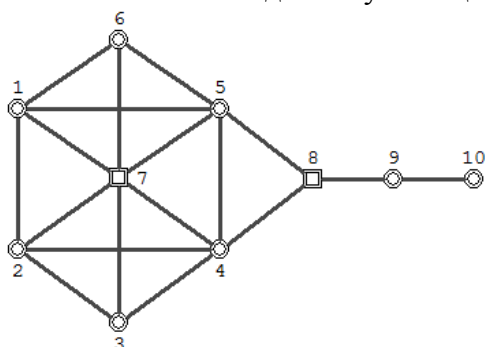


Рис. 1. Граф, на котором выделены вершины с наибольшей центральностью

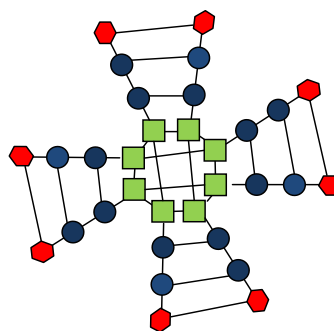


Рис. 2. Граф с вершинами, распределенными согласно уровням центральности

В большинстве «force-directed» методов вершины графа представляются заряженными частицами, которые отталкиваются друг от друга, а ребра – пружинами, которые связывают смежные вершины графа силой притяжения, когда смежные вершины удалены друг от друга, и отталкивания, когда они находятся слишком близко.

Существующие методы укладки динамических графов и сетей не позволяют построить изображения, удовлетворяющие реализованному нами ограничению. Поэтому в работе представлен метод, в основе которого подход, предложенный Фрутерманом и Рейнголдом [4], и модифицированный с учетом локального ограничения по центральности. Для этого введены дополнительные силы  $F_{level}$  и  $F_{grav}$ .

$F_{level}$  контролирует нахождение вершины на уровне, соответствующем ее степени центральности, то есть в зависимости от того, изменился ли вес вершины  $w_i$  по сравнению с значением в предыдущий момент времени, перемещает вершину в геометрическую область, соответствующую своему уровню центральности согласно выражению (3), то есть

$$F_{level}(v_i, t_k) = \begin{cases} \lambda(w_i), q(v_i, t_k) > q(v_i, t_{k-1}), \\ -\lambda(w_i), q(v_i, t_k) < q(v_i, t_{k-1}), \\ 0, q(v_i, t_k) = q(v_i, t_{k-1}). \end{cases} \quad (5)$$

где  $\lambda(w_i)$  определяет вектор направления силы  $F_{level}$ ;  $q(v, t)$  – функция активации веса вершины, которая определяется индексом центральности вершины в момент времени  $t$ :

$$q(v, t) = c(v_i, t) \quad (6)$$

Сила гравитации  $F_{grav}$  для любых смежных вершин  $v_i, v_j, i \neq j$  в момент времени  $t_k$  притягивает вершину  $v_i$  к вершине  $v_j$ , если для их весовых коэффициентов справедливо, что  $w_i < w_j$ , и вес ребра  $w_{ij}$  увеличился по сравнению со своим значением в предыдущий момент времени  $t_{k-1}$ . В противном случае заданная сила выступает как антигравитационная и отталкивает вершину  $v_i$  от  $v_j$ , то есть

$$F_{grav}(v_i, v_j, t_k) = \begin{cases} \eta(w_{ij}), f(e_{ij}, t_k) > f(e_{ij}, t_{k-1}), \\ -\eta(w_{ij}), f(e_{ij}, t_k) < f(e_{ij}, t_{k-1}), \\ 0, f(e_{ij}, t_k) = f(e_{ij}, t_{k-1}). \end{cases} \quad (7)$$

где  $\eta(w_{ij})$  определяет вектор направления силы  $F_{grav}$ ;  $e_{ij}$  – ребро между вершинами  $v_i, v_j, i \neq j$ ,  $f(e, t)$  – функция активации веса ребра:

$$f(e, t) = f(e, t-1) + a(e, t) - d(e, t), \quad (8)$$

где  $a(e, t)$  – величина приращения взаимодействия в момент времени  $t$ :

$$a(e, t) = a_h, a_h \in A, h = 0, \dots, h_{\max}, \quad (9)$$

$d(e, t)$  – функция деактивации веса ребра с течением времени:

$$d(e, t) = \begin{cases} 0, f(e, t) \leq 0, \\ \varphi(t), f(e, t) > 0. \end{cases} \quad (10)$$

Принцип предложенного метода заключается в последовательности шагов:

Шаг 1. Строится начальная укладка  $L_0$  для  $t_0 \in T$ , где каждая вершина  $v_i \in V^{full}$  находится на уровне  $k_{\max}$ , соответствующем вершинам с минимальной центральностью, ребра не визуализируются ( $E = \emptyset$ );

Шаг 2.  $\forall t_i \in T, i \neq 0$  последовательно выполняются следующие этапы:

- 1) строится начальная укладка  $L_i = L_{i-1}$  путем слияния с предыдущей;
- 2)  $\forall v_i \in V$  вычисляется вес  $w_i$ , согласно функции активации вершины (6);
- 3)  $\forall v_i \in V$  вычисляются силы, действующие на вершины: сила притяжения смежных вершин  $F_{attr}$ , сила отталкивания  $F_{rep}$ , сила гравитации  $F_{grav}$ , сила для контроля принадлежности вершины уровню центральности  $F_{level}$  и суммарная сила:

$$F_{total} = F_{attr} + F_{rep} + F_{grav} + F_{level}; \quad (11)$$

- 4) происходит итерационное перемещение вершин;

5) строится итоговая укладка  $L_i$  (графическая модель сети).

В настоящее время существует широкий спектр инструментов визуализации графов, причем не было разработано ни одного универсального программного продукта. Поэтому для оценки качества укладки графов с помощью предложенного метода разработан программный комплекс, в котором реализованы как классические принципы визуализации, сформированные в работах зарубежных ученых Идса, Камада и Кавайи, Фрутермана и Рейнголда, Дэвидсона и Харела, так и более современные подходы Харела и Корена, Нгуена и Хуанга. Благодаря этому возможно обеспечить единые условия для сравнения упаковок, полученных с помощью различных алгоритмов по различным критериям. Программный продукт представляет веб-приложение на базе технологии Java и программного модуля JUNG [5] с развертыванием на веб-сервере Apache HTTP Server и источником данных СУБД MySQL. С помощью разработанного программного комплекса построена и визуализирована социальная сеть Международного факультета прикладных информационных технологий Саратовского государственного технического университета.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Freeman L.C. Visualizing Social Networks / L.C. Freeman // Journal of Social Structure. 2000. Vol. 1(1).
2. Долинина О.Н. Использование графовых моделей для визуализации социальных сетей образовательной организации / О. Н. Долинина, В. В. Печенкин, В. В. Тарасова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 43. С. 210-214.
3. Freeman L.C. Centrality in Social Networks: Conceptual clarification / L. C. Freeman // Social Networks. 1979. N 1 (3). P. 215-239;
4. Fruchterman T. Graph drawing by force-directed placement / T. Fruchterman, E. Reingold. Software-Practice and Experience, v. 21, 1991. 1129-1164.
5. JUNG. Java Universal Network/Graph Framework [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://jung.sourceforge.net/>

#### **Долинина Ольга Николаевна –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладные информационные технологии», декан Международного факультета прикладных информационных технологий, заведующий кафедрой «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета

#### **Печенкин Виталий Владимирович –**

доктор социологических наук, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета

#### **Тарасова Вероника Вячеславовна –**

аспирантка, ассистент кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета

#### **Шацких Павел Павлович –**

магистрант кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 11.10.10, принята к опубликованию 26.10.10*



УДК 81.32

**М.А. Большакова**

### **СОЗДАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА В НЕЯЗЫКОВЫХ ВУЗАХ**

*Рассматривается создание и функционирование автоматизированной обучающей системы. Она предназначена для освоения студентами языковой среды. С помощью применения в рамках предложенной системы C - TF-тестов осуществляется эффективный контроль и анализ знаний учащихся. Это в конечном итоге эффективно отражается на учебном процессе и качестве получаемых знаний.*

Образовательный процесс, обучающая система, автоматизация, метод тестирования

**M.A. Bolshakova**

### **CREATION OF THE AUTOMATED LEARNING SYSTEM FOR LEARNING OF FOREIGN LANGUAGE IN NOT LANGUAGE HIGH SCHOOLS**

*The article tells about creation and functioning of the automated learning system. It helps students to master the language environment. By means of application of tests there is an effective control and the analysis of knowledge of students. It, finally, is effectively reflected in educational process and quality of received knowledge.*

Educational process, learning system, automation, testing method

Современное образование в России переходит на новую ступень развития в связи с присоединением к Болонскому процессу, способствующему сближению и гармонизации систем образования стран Европы с целью создания единого европейского пространства высшего образования. В связи с этим становится актуальным знание иностранных языков не только студентами языковых высших учебных заведений, но и студентами, а также аспирантами и магистрантами неязыковых вузов.

Полноценное участие в научной работе обеспечивается хорошим уровнем знания иностранного языка в определенной предметной области. Сотрудничество со многими зарубежными университетами, в том числе университетами Германии, инициировало различные программы обмена специалистами в прикладных и гуманитарных областях. Как пример, германская служба академических обменов DAAD, которая сотрудничает с Россией более 20 лет, и предлагает студентам различные учебные программы. В последнее время DAAD практикует научные стажировки молодых ученых для сбора материала по диссертационной работе, повышения научной квалификации и обучения в аспирантуре, защиты диссертации в Германии. Все это является стимулом для изучения немецкого языка по выбранной научной специальности. Несмотря на возможность общения в международных конференциях, семинарах и т.д. студенты и молодые ученые прикладных специальностей не могут воспользоваться этим потенциалом. В первую очередь, это связано с начальной подготовкой абитуриентов, которые поступают в вуз по основным предметам, не уделяя требуемого внимания языку. В дальнейшем иностранный язык является общеобразовательным предметом, кото-

рый изучается не более 100 часов для первого курса и 64 часов для второго курса. Далее обучение для студентов завершается, возобновляясь только в магистратуре. Учебные программы в неязыковых вузах рассчитаны не на углубленное изучение и коммуникативное общение, а на восстановление пробелов школьной программы. Следует также отметить человеческий фактор (болезнь, пропуски студентов), отмены занятий в праздничные дни, карантин и т.д., которые сокращают время для практических занятий. В связи с этим целесообразно уделять внимание применению прогрессивных методов обучения с использованием инновационных информационных технологий.

Для оптимизации учебного процесса нами предложена автоматизированная обучающая система, которая предназначена для передачи обучаемому знаний и для оценки текущего уровня знаний относительно некоего эталона (за эталон принимаются знания преподавателя).

Внедрение предложенной системы не заменяет человека-педагога или традиционные учебные пособия, а дополняет и расширяет их возможности. Так, обучаемый может в рамках самостоятельной работы закрепить пройденный материал или восполнить пробелы для требуемого в вузе уровня знания языка. В этом случае преподавателю не придется тратить время на объяснение простых грамматических правил, что позволит более детально углубиться в тонкости языка и коммуникативного общения между студентами и преподавателем на иностранном языке, в частности просмотр фильмов или прослушивание аудиозаписей.

Важнейшей функцией автоматизированных обучающих систем является контроль знаний учащихся. В нашей системе выбран метод тестирования. Это обусловлено достаточно высоким уровнем объективности, действительности, достоверности, практичности, а также экономии времени. Из множества тестовых процедур для контроля знания профессиональной лексики мы выделили С-тест, который создан в 1981 году К. Клейн-Брейли и У. Рац [1]. Этот вид тестирования стал основным инструментом для определения языковой компетенции, которому посвящено более 260 публикаций. Теперь С-тесты определяют уровень знаний более чем в 20 языках мира.

Методика проведения С-теста состоит в организации из четырех или пяти коротких текстов, так называемых *Teiltests*, которые логически самостоятельны. Для классического С-теста осуществляется деление второй части каждого третьего слова, причем в тексте должно быть не более 20 делений. Первое и последнее предложения остаются без изменений для формирования у испытуемого понятийного смысла текста. Каждое задание выполняется не более 5 минут, а полный тест – 20 - 25 минут.

Достоинство С-теста заключается в соблюдении вышеперечисленных свойств тестирования. Испытуемый должен обладать определенным языковым уровнем, для того чтобы реконструировать текст. Чем выше языковые возможности, тем лучше результаты С-теста. Результат теста показывает реальный уровень языковой способности испытуемого. Суммарный показатель решений отдельных, не связанных друг с другом текстов позволяет выявить действительный уровень знания иностранного языка.

Для определения сильных и слабых сторон в языковой предметной области используются специальные тесты, называемые *teilstfertigkeitstests* – TF-tests. Они основываются на базе С-тестов и проверяют определенную, специфическую область, например лексику или грамматику. Если необходимо проверить лексическую базу студентов, то выделяют специальные слова, образующие знания в определенной области (термины по истории, юриспруденции и т.д.).

Для проверки знаний лексики немецкого языка у студентов исторической специальности в период работы международной программы разработаны и апробированы 2 пакета тестов, которые состояли из специальных (TF-test) тестов, контролирующих каждый этап учебной программы по истории.

Для создания тестов использовались материалы из немецких учебников по истории: *Zeitreise Bde. 1, 2, 3; Expedition Geschichte Bde. 1, 2, 3*. Учебные пособия ориентированы на

учащихся в основной школе Германии. Созданные тесты опробованы на носителях языка для выявления трудностей при выполнении заданий. После проверки тестов и внесения модификаций протестирована группа русскоязычных студентов исторического факультета СГУ, которая включала двенадцать студентов (2 - 10 семестры обучения) и двух докторантов. Результаты тестирования студентов показали относительно хорошее владение специальной (в заданном контексте исторической) лексики.

Пример TF-test:

Land und Staat der Ägypter

Um 3000 v. Chr. wurden die Gebiete Ober- und Unterägyptens, wahrscheinlich als Folge von Kriegen, vereinigt. Das ägyptische \_\_\_\_\_ch, von den Ägyptern als die beiden Länder bezeichnet, wurde im Westen durch die Libysche \_\_\_\_\_ste und im Osten durch das Rote \_\_\_\_\_er begrenzt. Durch \_\_\_\_\_oberungen erweiterten die Ägypter ihr \_\_\_\_\_nflussgebiet bis Syrien im Norden und im Süden bis Obernubien. Alles, was nicht zu den Äckern und \_\_\_\_\_ldern gehörte, \_\_\_\_\_schrieben sie mit einer einzigen Hieroglyphe. Sie stand für Wüste, Gebirge und Ausland. Auf welche Weise wurde das \_\_\_\_\_menleben der Menschen geregelt? Die Ägypter schufen eine \_\_\_\_\_nung, die wir als Staat \_\_\_\_\_zeichnen. Innerhalb dieser Ordnung hatte jeder an seinem \_\_\_\_\_atz bestimmte \_\_\_\_\_gaben zu erfüllen. An der \_\_\_\_\_itze des altägyptischen Staates stand der Pharo als \_\_\_\_\_leinherrscher. Dieses \_\_\_\_\_mt wurde von Männern \_\_\_\_\_geübt. Nur ganz wenige Frauen gelangten jemals an die Spitze des \_\_\_\_\_ates. Der Pharao wurde als \_\_\_\_\_tt angesehen. Daher galten die Verpflichtungen aller ihm \_\_\_\_\_tergebenen als Dienst für den großen Gott. Daraus ergab sich für den Pharao die Aufgabe, die Ordnung im \_\_\_\_\_nde zu gewährleisten. Das schloss die Versorgung der Lebenden und den Totenkult ein.

Сравнение результатов С - TF- тестов позволило сделать следующий вывод: количество правильных ответов TF-тестов на 5,4% выше, чем С-теста. Таким образом, владение специальной лексикой у студентов исторического факультета выше общей.

У докторантов различие в оценке знаний между общей и специальной лексикой составляет 2,8%, т.е. почти в два раза ниже.

Таким образом, результат тестирования показал, что обучаемые, изучающие иностранный язык в специальной области, обычно на первом этапе знакомятся с терминологией и специальной лексикой, однако в дальнейшем уровень их знаний возрастает, и различие между общей и специальной лексикой существенно уменьшается.

Из приведенного выше примера следует, что автоматизированная обучающая система помогает освоить языковую среду, а также облегчает преподавателю контроль и анализ знаний учащихся. Это в конечном итоге эффективно отражается на учебном процессе и качестве получаемых знаний.

Проведенные испытания во время стажировки в январе 2008 г. в университете Duisburg-Essen (Германия) позволили не только выявить положительные аспекты применения разработанного программного средства, но и определить пути дальнейшего развития. Выделены основные направления развития дальнейшей работы:

1. Повышение качества оценки уровня знаний с учетом индивидуальных психофизиологических характеристик тестируемого и семантического анализа представленных ответов.

2. Переход на новую технологическую платформу хранения информационной базы и базы тестов для увеличения объема хранимой информации и повышения скорости доступа к ней и ее обработки.

3. Разработка механизмов масштабирования системы и переход на WEB-технологии для организации информационно-обучающего портала в рамках присоединения России к Болонскому процессу, способствующему сближению систем образования стран Европы с целью создания единого европейского пространства высшего образования.

4. Разработка портативной оболочки для создания тестов, входящих в автоматизированную обучающую систему и дальнейшее ее использование,

5. Получение коммерческого продукта:

– реализация автономной среды генерации тестов и тестирования – коробочный вариант системы;

– без информационной базы тестов, для использования в качестве инструментальной среды подготовки собственных тестов.

6. Продукт со сформированной средой для проведения тестирования для различных уровней языковой подготовки.

7. Организация коммерческого доступа к информационно-обучающему порталу с возможностью использования готовой базы тестов и механизмов оценки уровня знаний тестируемого.

Решение поставленных задач позволит разработать автоматизированную обучающую систему, которая включает методологию C- и TF - Тестов, а также программную оболочку для самостоятельного создания преподавателями тестов, проверяющих уровень знаний в нужной им области языка. Система позволит существенно повысить быстродействие и надежность получаемых оценок уровня знаний иностранного языка у тестируемых, а также персонифицировать обучение и минимизировать ресурсы для достижения требуемого уровня знаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Grotjahn, Rüdiger (Hrsg.): Der C-Test. Theoretische Grundlagen und praktische Anwendung (Bd. 1). Bochum: Brockmeyer, 1992.

**Большакова Мария Александровна** – аспирант кафедры романских языков Педагогического института Саратовского государственного университета

*Статья поступила в редакцию 05.10.10, принята к опубликованию 21.10.10*

УДК 637.513:637.522/.523.2

**П.С. Попов, Е.П. Мирзаянова, В.П. Ангелюк**

#### **КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД В РАЗВИТИИ КОЛБАСНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ**

*Решение вопроса разработки имитационного шпика на современном этапе развития технологии мясopодуктов представляет собой решение технологической проблемы, имеющей важнейшее значение для мясной промышленности, что обусловлено рядом технологических, медико-биологических и экономических причин. Данная разработка позволит исключить зависимость мясopерерабатывающих предприятий от доступности, а главное, качества бокового и хребтового шпика.*

Имитационный шпик, энзимная переэтерификация

**P.S. Popov, E.P. Mirzayanova, V.P. Angelyuk**

#### **THE CONCEPTUAL APPROACH OF SAUSAGE PRODUCTION AT THE PRESENT STAGE**

*The issue of development of the imitation bacon at the present stage of development of technology of meat products is the solution of technological problems that are crucial for the meat industry, due to a number of technological, biomedical and economic reasons. This development would eliminate the dependence on the availability of meat processing enterprises, and most importantly, the quality of the lateral and backfat.*

#### Imitation fat, enzymatic transesterification

Шпик – это свиной подкожный жир со шкуркой или без неё. Минимальная толщина шпика 1,5 см, минимальная масса – 0,6 кг. Поверхность шпика должна быть чистой, без остатков щетины (при выработке шпика в шкуре или с частично снятой шкурой), без кровоподтеков, пятен и загрязнений. Свиной жир имеет различную структуру в зависимости от своего расположения. Тем не менее все виды шпика нашли применение в производстве мясных продуктов питания [3]. Шпик является одним из самых популярных видов мясного материала, используемых в производстве колбас и мясных деликатесов. Кроме того, свиной шпик продается и как самостоятельный продукт, пользующийся большим спросом у потребителей. Ежегодная потребность мясной промышленности России в шпике составляет около 450 тыс. т [4].

Целью проекта является разработка научно обоснованной экономически эффективной ресурсосберегающей технологии имитационного шпика для создания мясопродуктов функционального назначения с использованием гаммы натуральных продуктов растительного происхождения (рис. 1).

Ситуация стимулирует производителей пищевых добавок на разработку технологий производства продуктов, имитирующих натуральный шпик. При этом основными задачами являются: получение высококачественного продукта, относительно дешевого по сравнению с используемым жировым сырьем; улучшение технологических показателей имитационного шпика по сравнению с натуральным (термостойкость, адгезия к фаршу); использование в составе имитационного шпика жидких растительных масел и твердых растительных жиров с целью его использования в вегетарианских продуктах, не уступающих по качеству натуральным [1].

Мировая проблема повышения роста потребления мясных продуктов и роста цен на мясное сырье заставляет производителей колбасных изделий уделять все большее внимание внедрению ресурсосберегающих технологий при обеспечении высокого и стабильного качества выпускаемой продукции. Решение вопроса разработки комбинированного шпика на современном этапе развития технологии мясопродуктов представляет решение технологической проблемы, имеющей важнейшее значение для мясной промышленности, что обусловлено рядом технологических, медико-биологических и экономических причин [2].

В частности, разработка позволит исключить зависимость мясоперерабатывающих предприятий от доступности, а главное, качества бокового и хребтового шпика, которая зависит от множества разнообразных факторов (пол, возраст, порода животного, рацион кормления, упитанность, условия содержания и убоя, параметры хранения сырья, анатомическое происхождение), вызывающих существенные изменения общего химического и жирнокислотного состава жирсырья, колебания в значениях температур плавления и застывания, ин-



Рис. 1. Имитационный шпик, полученный методом энзимной переэтерификации

тенсификацию процессов окисления и гидролиза. Негативным результатом нестабильности свойств жирсырья, используемого в колбасном производстве, является появление бульонно-жирового отека, эффекта выплавления и выкрашивания кусочков шпика из мясной фаршевой основы, изменение цвета и консистенции у включений жира, быстрая порча (осаливание) готовой продукции.

Таким образом, реализация проекта позволит решить проблему качества и дефицита жирового сырья в мясоперерабатывающей отрасли. Внедрение данной инновационной разработки позволит сократить процент производственного брака, создаст возможность разработки мясопродуктов высокой биологической ценности функционального назначения, обеспечит выпуск продукции высокого и стабильного качества при существенном снижении себестоимости, что, в свою очередь, будет способствовать повышению конкурентоспособности продукции в целом.

Анализ конкурентной базы выявил на отечественном продовольственном рынке более 10 видов коммерческих препаратов и технологий (как холодного, так и горячего способа) приготовления имитационного шпика, однако систематизированные сведения о свойствах данных продуктов в доступных научно-технических источниках отсутствуют. Учитывая проблему нестабильности качества сырья в мясной отрасли, дефицит натурального сырья, зависимость мясоперерабатывающих предприятий от импортного сырья, агрессивность ценовой политики на пищевом рынке, можно полагать, что исследования, направленные на разработку научно обоснованной экономически эффективной ресурсосберегающей технологии имитационного шпика, являются своевременными и актуальными.

Экспериментальная установка (рис. 2) для получения имитационного шпика методом энзимной переэтерификации выполнена в виде функциональной схемы автоматизированного процесса. Процесс осуществляется при неизменной температуре и барометрическом давлении, для этого в реакторе установлены универсальные датчики, контролирующие параметры процесса, а также свойства продукта и внешние параметры окружающей среды.

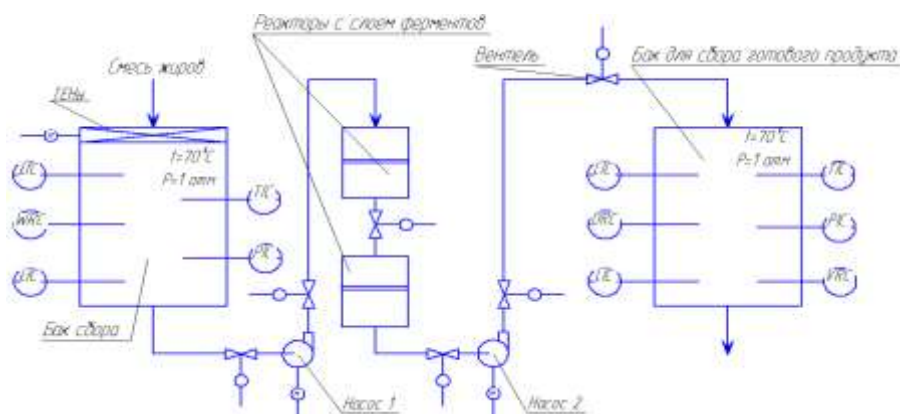


Рис. 2. Функциональная схема автоматизированного процесса для получения имитационного шпика методом энзимной переэтерификации

Полученный продукт, представляющий собой твердую высококонцентрированную эмульсию, имеет устойчивые органолептические и физико-химические показатели; технология его производства легко воспроизводима в заводских условиях; предварительная экономическая оценка показала преимущество разработанного продукта по сравнению с традиционным (и одновременно дефицитным) свиным шпиком. Кроме того, характеристики имитационного шпика по многим позициям (пониженный уровень энергетической ценности и содержания холестерина, наличие ненасыщенных жирных кислот групп «Омега 3» и «Омега 6» и т.д.) соответствуют требованиям, выдвигаемым к ингредиентам рецептур, используемым при производстве продуктов здорового питания и мясопродуктов с пролонгированным периодом хранения.

Лабораторные исследования показали возможность качественного регулирования состава рецептурной композиции имитационного шпика с учетом дефицита основных микронутриентов в питании населения различных регионов РФ. Использование в составе имитационного шпика жидких растительных масел и твердых жиров традиционной номенклатуры предполагает его применение в вегетарианских продуктах, продуктах функционального назначения, в том числе категории «Халяль».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антипова Л.В. Пищевые белково-жировые добавки как заменитель основного сырья в составе мясных фаршевых изделий / Л. В. Антипова, С. В. Полянских // Прогрессивные технологии и оборудование для пищевой промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 1997.
2. Брянская И.В. Исследование функционально-технологических свойств белковых добавок и белково-жировых эмульсий : метод. указания / И.В. Брянская, Н.В. Колесникова, А.П. Олефирова. Улан-Удэ: ВСГТУ, 1999. С. 31.
3. Нацаренус А.И. Основы технологии мяса и других продуктов переработки скотосырья / А.И. Нацаренус, А.И. Анфимов. ОГИЗ техиздание, 1933. 505 с.
4. Сучков В.В. Имитационный шпик. Применение комплексных пищевых добавок ЗАО «Компания МИЛОРД» для приготовления имитационного шпика / В.В. Сучков, И.А. Попелло // Мясная сфера. 2008. №1 (51). 30 с.
5. <http://www.intershell.ru/price>

#### **Попов Павел Сергеевич –**

студент Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова

#### **Мирзаянова Екатерина Петровна –**

старший преподаватель кафедры «Технологии мясных и молочных продуктов», заместитель декана по научно-исследовательской работе и международным связям технологического факультета Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова

#### **Ангелюк Валентин Петрович –**

доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты пищевых производств» Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

УДК 656.025

**В.Н. Трегубов**

### **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ СИНХРОНИЗАЦИИ**

*Рассмотрены особенности синхронизации в системе общественного пассажирского транспорта. Определены принципы синхронизации на общественном пассажирском транспорте, выделены ключевые задачи для различных иерархических уровней системы общественного транспорта. Предложен числовой показатель характеризующий синхронизацию в логистических системах.*

Синхронизация, общественный пассажирский транспорт,  
логистическая система, показатель синхронизации

V.N. Tregubov

## THE SYNCHRONIZATION CONCEPT FOR METHODOLOGY OF MANAGEMENT OF SYSTEM OF CITY PUBLIC TRANSPORT

*Features of synchronization in system of public passenger transport are considered. Synchronization principles on public passenger transport are defined, key problems for various hierarchical levels of system public transport are allocated. The numerical indicator characterizing synchronization in logistical systems is offered.*

Synchronization, public passenger transport, logistical system,  
synchronization indicator

Объединение прогрессивных логистических и информационных технологий создает общую основу для интеграции потоков различных видов в глобальную информационную логистическую систему, обеспечивающую высокую скорость реакции на изменения внешней среды. Для общественного пассажирского транспорта это означает переход от локальной логистики пассажирского транспорта (на уровне отдельного маршрута или единичного предприятия) к интегральной, включающей задачи обеспечения оптимальной временной и пространственной организации потоковых процессов всех предприятий-участников логистической системы региона или даже страны в рамках единого информационного пространства.

При таком подходе эффективность деятельности пассажирской транспортной системы региона будет зависеть от достижения управляемого резонанса логистической цепи – результата синхронизации его внутренних потоковых процессов и синхронизации потоковых процессов логистических цепей.

Обеспечение синхронизации материальных, финансовых и информационных потоков деятельности субъектов в системе общественного пассажирского транспорта в составе логистической системы предполагает выделение двух направлений синхронизации: по локальным связям между потоковыми процессами и интегрального уровня. При этом информационные потоки выполняют координирующую роль, осуществляя взаимодействие между потоковыми процессами других видов и являясь главным объектом управления в логистических системах по отношению к материальным и финансовым потокам.

Для отражения изменений качественных состояний в пределах одного логистического потока в рамках динамической системы используется понятие фазового пространства. Под фазовым понимается пространство, на котором представлено множество всех состояний системы так, что каждому возможному соответствует точка фазового пространства. Такая формализация понятия системы, включающая определение соответствующего фазового пространства, характерна для динамических систем, в т.ч. для системы общественного пассажирского транспорта (ОПТ). При этом динамика системы ОПТ может быть как детерминированной, так и вероятностной. В фазовом пространстве вероятностная динамика системы определяется через фазовые переходы – качественную трансформацию логистических потоков процессов ОПТ. Таким образом, под фазовым переходом в логистической системе ОПТ будем понимать качественную трансформацию потокового процесса в пределах одной формы потока или из одной формы в другую. Примерами являются трансформация пассажиропотока в финансовый поток, материального потока ресурсов (топлива, запасных частей и т.д.) в поток маршрутных транспортных средств и др. Эффективность фазового перехода обеспечивается



синхронизацией потоковых процессов в точке осуществления перехода, в месте трансформации взаимодействующих потоков – отдельном звене логистической системы.

Степень синхронизации взаимодействующих потоков будет определяющим фактором эффективности происходящей трансформации. Если хотя бы один из факторов не соответствует потребностям логистического процесса ОПТ, то трансформация либо не произойдет вообще, либо будет происходить с меньшей эффективностью. Таким образом, выявление сущности взаимодействия (функциональной зависимости) различных потоков обеспечивает возможность их эффективной синхронизации в точке трансформации.

Таблица 1

## Направления синхронизации в логистической системы ОПТ

Уровень логистической системы	Логистическая система	Задачи синхронизации
Микрологистический	Отдельного маршрута	Согласование пассажиропотока и движения транспортных средств
		Согласование количества транспортных средств и эффективности работы маршрута
		Согласование типа подвижного состава и пассажиропотока
		Прогнозирование пассажиропотока на маршруте
	Направления перевозки	Согласование взаимодействия нескольких маршрутов
		Согласование взаимодействия различных видов транспорта
Транспортного предприятия	Согласование имеющегося подвижного состава и обслуживаемых маршрутов	
	Прогнозирование параметров развития и эксплуатационных показателей	
Мезологистический	Города	Согласование взаимодействия различных маршрутов в городе
		Согласование взаимодействия различных видов общественного транспорта в городе
		Согласование конкурсного распределения маршрутов и возможностей транспортных предприятий
		Прогнозирование параметров транспортной системы города на среднесрочную и долгосрочную перспективу
	Региона	Согласование взаимодействия субъектов перевозочной деятельности региона
		Формирование региональной политики в области общественного транспорта
Макрологистический	Страны	Прогнозирование параметров транспортной системы региона на среднесрочную и долгосрочную перспективу
		Формирование государственной политики в области общественного транспорта
		Разработка законодательных актов, определяющих основные регламентирующие принципы и аспекты взаимодействия субъектов

Конкретизировав значение понятия синхронизации для логистической системы ОПТ, рассмотрим существующие возможности и методологические подходы к управлению процессом синхронизации в логистической системе ОПТ.

Инструментами синхронизации потокового процесса ОПТ должны выступать соответствующие параметры синхронизируемых потоковых процессов. Например, при синхронизации потока пассажиров и потока маршрутных транспортных средств на отдельном маршруте, инструментами синхронизации являются расписание движения транспортных средств, выбор типа транспортных средств, определение рационального количества транспортных средств на маршруте, а также параметры финансового и информационного потоков и параметры соответствующих потоковых процессов как стадий развития совокупности последовательных действий.

Синхронизация может осуществляться на различных уровнях иерархии логистической системы ОПТ, что определяет использование различных методов синхронизации применяемых подходов. Нами осуществлена систематизация основных методологических и методических подходов к решению задач синхронизации на различных иерархических уровнях логистической системы ОПТ. В обобщенном виде результаты представлены в табл. 1. Теоретической основой синхронизации в системе ОПТ должны выступать общенаучные принципы синхронизации в социально-экономических системах, в частности методология адапционного управления объектами синхронизации, наличие информационного взаимодействия между ними и наличие периодических циклических процессов.

Методологическая база обусловлена рассмотрением системы общественного пассажирского транспорта как логистической системы. Таким образом, в основе синхронизации будет находиться взаимодействие субъектов обменом различными видами потоков. Также синхронизация зависит от функций логистики в рассматриваемой системе. Используемая логистическая концепция определяет приоритеты синхронизации и ее ориентацию на потребителя, на рынок или на эффективность транспортного процесса.

Исследование процессов синхронизации происходит на различных иерархических уровнях системы ОПТ, что определяет взаимодействующие объекты, а также задачи и критерии синхронизации (рис. 1).

Первичным аспектом изучения синхронизации в логистической системе пассажирского транспорта (ЛСПТ) является решение задач анализа (определение свойств системы по ее структуре и значениям параметров) и синтеза (определение структуры и параметров системы по заданным свойствам), что не может быть обеспечено одними лишь средствами умозрительной оценки поведения системы в различных условиях функционирования, а требует разработки системы показателей, характеризующих синхронизационные процессы.

Количественная информация о поведении и состоянии управляемого объекта могут быть получены либо экспериментально, если доступно наблюдение и фиксация поведения соответствующих реальных объектов, либо расчетным путем, если имеется математическое описание объекта управления.

Помимо весьма существенных трудностей, как первого, так и второго пути получения количественных данных о системе, существует также проблема наглядной их интерпретации. Эта проблема заключается в том, что полученные данные должны позволять решать конкретные практические задачи.

Для этой цели массивы информации, описывающие состояние исследуемого объекта в различные моменты времени и при различных условиях, должны быть сведены к небольшому числу обобщенных характеристик.

Наиболее простым и эффективным способом является оценка свойств с помощью числового показателя. При этом он должен удовлетворять ряду требований:

- 1) представлять величину, зависящую от процесса функционирования ЛСПТ, и вычисляться, исходя из математического описания исследуемой системы;
- 2) предоставить наглядное представление о определенной свойстве системы;

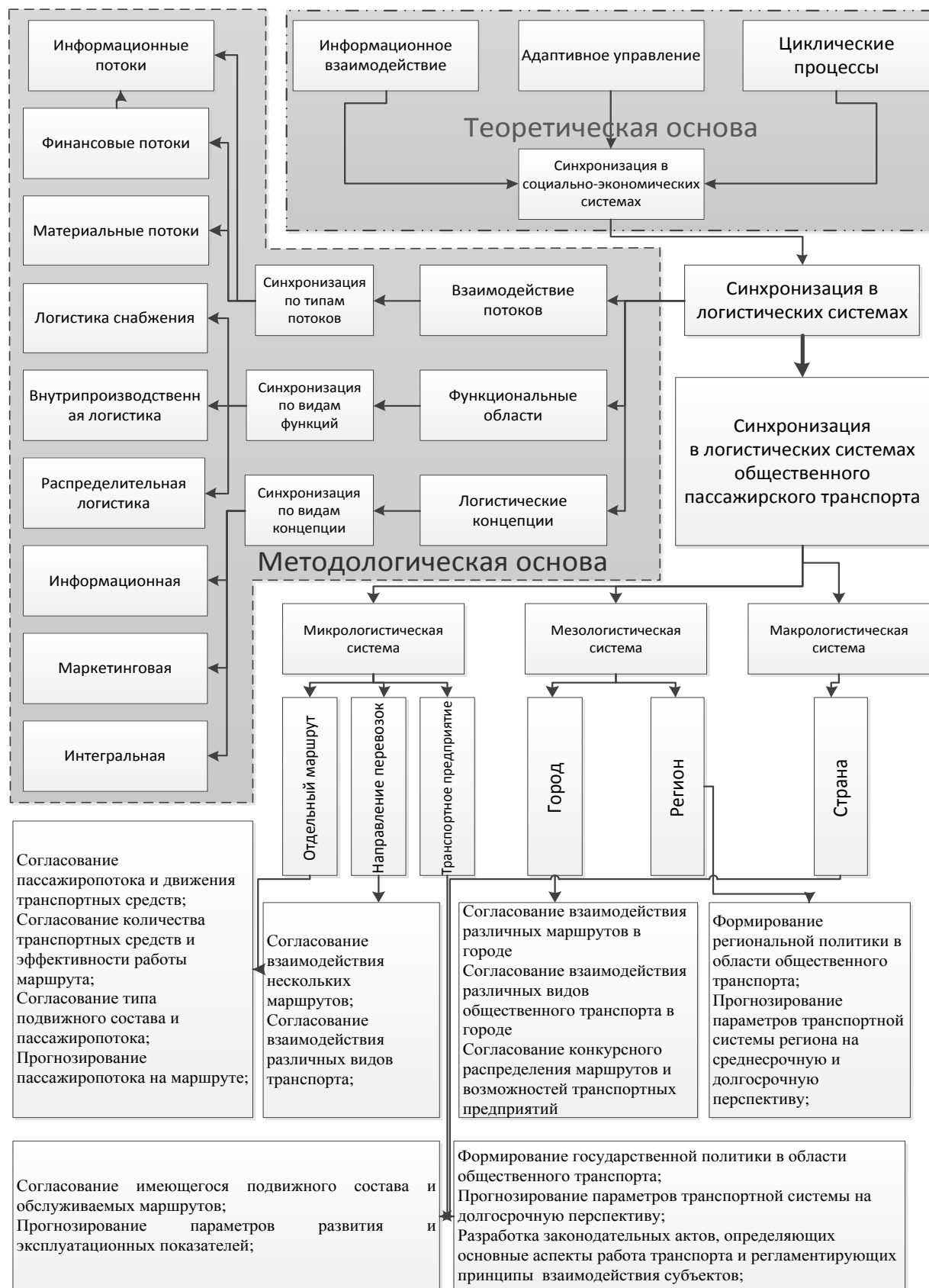


Рис.1. Теоретическая и методологическая основа синхронизации на ОПТ

3) допускать вычисление заданной характеристики по статистическим данным за определенный промежуток времени.

4) показатели должны позволять сопоставлять результаты расчетов, выполненные для одной системы в различные периоды времени;

5) анализ значений показателей или динамики его изменения должен позволять принимать управленческие решения и оценивать их эффективность.

С математической точки зрения, показатель, оценивающий логистическую систему, зависит от ряда параметров. Среди них основную роль играют параметры, характеризующие деятельность системы,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$  и воздействие внешней среды,  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ . Таким образом, формально с математической точки зрения обобщающий показатель, характеризующий синхронизацию в логистической системе ОПТ, является функцией внутренних параметров системы и параметров внешней среды  $R = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$ .

Помимо параметров предприятия и внешней среды, явно фигурирующих в математическом описании, показатель зависит также от структуры, характера связей между подразделениями, вида управляющих алгоритмов и закономерностей функционирования, не поддающихся описанию с помощью параметров. Эти зависимости должны учитываться как видом функции, так и введением дополнительных структурных параметров.

Структура логистической системы определяет внутреннюю упорядоченность и организованность системы. Степень организованности или упорядоченности определяется степенью отклонения системы от максимально неупорядоченного состояния. В качестве меры упорядоченности или организованности системы понимают степень отклонения состояния системы от ее равновесия. Для логистической системы мера относительной организованности лежит в пределах от 0 до 1. Считается, что организованность системы представляет более высокую ступень упорядоченности системы [1, с. 122].

Для оценки качества функционирования автотранспортной системы предлагается использовать показатель организованности, либо адаптивности. Расчет двух показателей основан на использовании моделей максимальной и целевой энтропии. Энтропия является мерой первоначальной неопределенности состояния объекта управления. Чем больше число различных состояний объекта и меньше отличаются друг от друга их вероятности, тем больше энтропия объекта управления [2]. В данном случае под энтропией понимается мера информационной неупорядоченности в достижении поставленных целей. Описанные в [1] методики и результаты расчетов показывают достаточную эффективность использования коэффициента адаптивности для анализа, прогнозирования и управления деятельностью логистической системы имеющей большое число материальных потоков и имеющей фиксированный набор показателей работы.

Для анализа синхронизационных процессов нами предлагается использовать ряд показателей. Для определения показателей используются понятия система и всходящие в нее подсистемы. Синхронизация оценивается между подсистемами и определяется как достижение такого состояния подсистем, которое обеспечит максимальное достижение целей системы.

Показатель частной синхронизации определяют влияние достижения целей в отдельной подсистеме на цель всей системы и вычисляется по формуле:

$$S_i^u = O^u / O_i, \quad (1)$$

где  $S_i^u$  – показатель частной синхронизации для отдельной  $i$ -й подсистемы;  $O^u$  – полная организованность в системе;  $O_i$  – организованность в отдельной подсистеме.

Частный показатель синхронизации имеет диапазон изменения от 0 до 1. Значение 0 достигается, когда  $O^u$  равняется 0 независимо от  $O_i$  и описывает ситуацию, когда система полностью не достигает своих целей, независимо от состояние ее подсистемы (в крайнем случае,  $O_i$  может быть даже 1), такое состояние свидетельствует о полной рассинхронизации

целей системы и отдельной подсистемы. Значение 1 достигается, когда оба показателя  $O^I$  и  $O_i$  равны 1, что характеризует состояние полной синхронизации процессов для достижения целей системы.

Показатель полной синхронизации в системе вычисляется как произведение частных показателей для каждой подсистемы

$$S^I = \prod_{i=1}^N S_i^q, \quad (2)$$

где  $N$  – количество подсистем, на которые разделена система и между которыми вычисляется синхронизация;

Подставляя в эту формулу выражение для частного показателя синхронизации (1) получим

$$S^I = (O^I)^N / \prod_{i=1}^N O_i. \quad (3)$$

Эта формула выражает показатель синхронизации в системе через организованность системы в целом и в отдельных подсистемах. Вычисления и обобщение этой характеристики должны выполняться на основе показателей, определяемых деятельностью каждой подсистемы. В [3] приводятся методики расчета показателя организованности, но в них не учитываются особенности поведения логистических систем. Нами разработан обобщенный порядок расчета показателя синхронизации в логистической системе:

1. Выбор и обоснование показателей для вычисления показателя организованности. Каждая из рассматриваемых подсистем характеризуется большим набором показателей, описывающих ее функционирование. Эти показатели оцениваются на основе текущего состояния системы и характеризуют ее поведение. Для расчета показателя синхронизации необходимо выбрать показатели, которые наиболее полно описывают поведение системы и ее состояние в отношении заданных целей и могут быть получены на основе экспериментов, наблюдений или расчетов. Следует выбирать наиболее агрегированные показатели, зависящие от состояния всей системы и характеризующее его.

2. Исследование взаимосвязей между показателями. Большинство показателей, имеющих в подсистеме, взаимосвязаны. Эта связь может быть либо функциональной, тогда она описывается некоторым соотношением, либо стохастической, в этом случае имеется статистическое выражение связи. В любом случае, если два показателя сильно связаны друг с другом, то менее информативный из них может быть отброшен и не учитываться при расчете организованности. Для изучения имеющихся стохастических связей рекомендуется использовать корреляционный анализ.

3. Определение и обоснование целевых значений. Определение показателя организованности выполняется в отношении некоторых целей. Характеристики этих целей должны быть заданы количественно. Выбор значений характеристик цели и их обоснование является одной из важных задач при расчете организованности, так как от этого во многом зависит значение показателя организованности.

4. Определение закона распределения и его параметров по каждому показателю. Большинство показателей рассматриваемых подсистем формируются под воздействием большого числа факторов, каждый из которых не оказывает существенного влияния.

5. Расчет значений рассогласований и вероятности возникновения рассогласования.

6. Определение максимальной энтропии для каждого показателя, которая является базовым параметром, описывающим информационную неопределенность в системе и характеризует максимально возможную по показателям неопределенность, имеющую место в системе.

7. Определение целевой энтропии. Целевая энтропия является характеристикой неопределенности в достижении заданных целей.

8. Расчет организованности логистической подсистемы за заданный период времени

$$O_i = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N H_{u_i}}{\sum_{i=1}^N H_{\max}} \quad (4)$$

где  $N$  – число показателей, по которым производятся вычисления;  $H_{u_i}$  – целевая энтропия;  $H_{\max}$  – максимальная энтропия.

9. Вычисление показателей синхронизации по формулам (1) и (3).

В соответствии с приведенными методическими положениями разработана компьютерная программа, позволяющая автоматизировать анкету организованности по различным подсистемам. С помощью компьютерной программы выполнен расчет организованности системы управления пассажирскими перевозками городов Саратов. В качестве информационной базы исследования использовались данные обследований пассажиропотоков проведенных в 2009 г., отчеты о технико-эксплуатационных показателях ряда автотранспортных предприятий.

Для примера вычисления рассмотрим отдельный автобусный маршрут. Пассажиропоток на маршруте имеет циклическую динамику выражающуюся в внутрисуточных колебаниях (рис. 2).

Возможны различные варианты стратегии организации перевозок на данном маршруте:

1) первый вариант выражается в том, что на маршруте целодневно работают 12 единиц подвижного состава, которые максимально удовлетворяют потребности пассажиров, но в межпиковое время наполнение салона низкое, что не выгодно для компании перевозчика;

2) второй вариант предусматривает выпуск на маршрут 7 единиц подвижного состава, что соответствует потребностям маршрута в межпиковые периоды, но в часы пик пассажиры будут вынуждены находиться в переполненном салоне;

3) третий вариант требует разработки расписания работы подвижного состава с учетом различной потребности в подвижном составе на маршруте по часам суток, это менее предпочтительно для пассажиров сравнении с первым вариантом, так как увеличивает интервалы движения в межпиковый период, но предпочтительно для перевозчиков из-за уменьшения переменных издержек.

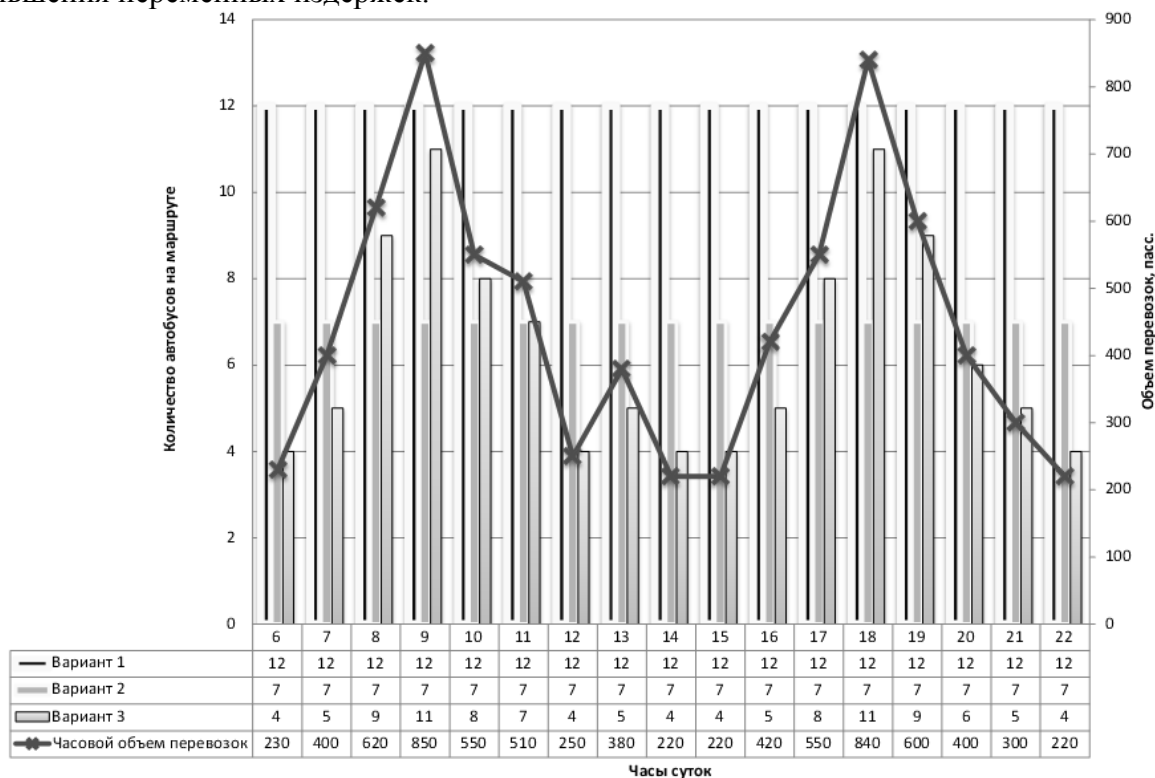


Рис. 2. Характеристика вариантов работы маршрута

Для всех трех вариантов был рассчитан показатели организованности и синхронизации (табл. 2).

Таблица 2

## Сравнение вариантов организации работы маршрута

Показатель	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Организованность системы в целом	0,65	0,35	0,8
Организованность подсистемы пассажиров	0,9	0,3	0,7
Организованность подсистемы компаний перевозчиков	0,6	0,7	0,95
Показатель синхронизации	0,78	0,58	0,96

Результаты расчетов свидетельствуют, что показатель синхронизации отражает сущность происходящих процессов и позволяет оценивать степень соответствия взаимодействующих подсистем. Таким образом, он может быть рекомендован для использования в качестве инструмента характеризующего взаимодействие подсистем обладающих циклической динамикой. В целом новый методологический подход к управлению интегрированными логистическими системами, в частности системами общественного транспорта, основанный на концепции синхронизации может быть использован в качестве одного из способов логистического администрирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Клочков В.Н. Адаптация и конкурентоспособность автотранспортных систем в рыночных условиях / В. Н. Клочков. СПб.: С.-Петербург. гос. инж.-экон. акад., 1999. 214 с.
2. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине / Н. Винер : пер. с англ. под ред. Г.Н. Поварова. 2-е изд. М.: Наука, 1983. 344 с.
3. Трегубов В.Н. Методы и модели логистической синхронизации на пассажирском транспорте: монография / В.Н. Трегубов. Саратов: СГТУ, 2009. 294 с.

**Трегубов Владимир Николаевич** –

кандидат экономических наук, доцент кафедры «Организация перевозок и управление на автомобильном транспорте» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

УДК 658.8

**В.Н. Трегубов**

### **КОНЦЕПЦИЯ СИНХРОНИЗАЦИИ КАК ОСНОВА АДМИНИСТРИРОВАНИЯ В САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*Рассматривается методология администрирования в логистических системах и особенности логистической координации в современных условиях. Показано, что в сложных интегрированных логистических системах администрирование выполняется путем синхронизации потоков.*

Логистическое администрирование, синхронизация, координация, самоорганизация

V.N. Tregubov

## THE SYNCHRONIZATION CONCEPT AS A BASIS OF ADMINISTRATION FOR SELF-ORGANIZATION LOGISTICAL SYSTEMS

*The article discusses questions of the administration methodology in logistical systems and feature of logistical coordination in modern conditions. It is shown that in the difficult integrated logistical systems administration is carried out by synchronization of flows.*

Logistical administration, synchronization, coordination, the self-organization

Современный уровень развития логистики и логистического менеджмента ориентирован на эффективное управление логистическими операциями, функциями и функциональными областями. Обобщение этой концепции привело к возникновению понятия «администрирование логистической системы» или «логистическое администрирование».

Под администрированием понимается управление на формальном уровне на основе приказов и распоряжений. Использование этого термина для обозначения управления в логистике обусловлено, в том числе и тем, что управление логистическими функциями и функциональными областями в значительной степени осуществляется на базе информационных технологий и соответствующего комплекса технических средств. Прослеживается явная аналогия с терминами, используемыми в информационных технологиях для обозначения процессов управления в сложных и распределенных информационных системах, в частности «системный администратор», «администратор локальной вычислительной сети» и т.п.

Задачи администрирования логистической системы (ЛС) проявляются в осуществлении управленческих функций: планирование, организация, анализ, контроль, учет. Эти функции традиционно входят в комплекс функциональных обязанностей персонала менеджмента любой компании.

Теоретики логистики [1, с. 808] определяют администрирование ЛС как комплекс управленческих функций и процедур, осуществляемых логистическими менеджерами фирмы (преимущественно с применением информационно-компьютерных технологий) для достижения стратегических, тактических и оперативных целей ЛС.

Ориентация на процессную интеграцию приводит к потребности эффективной координации на всех уровнях пересечения и взаимодействия процессов. Практика логистического менеджмента предполагает решение вопросов межфункциональной и межорганизационной координации. Эти решения должны быть заложены в систему менеджмента компании на стратегическом уровне, так как предполагают закрепление полномочий и ответственности за принятие решений в области координации за персоналом высшего и среднего звена управления логистикой фирмы.

Чем больше степень интеграции основных бизнес-процессов фирмы и чем выше уровень интеграции логистического процесса, тем меньше потребность в координации, так как она естественным образом вписывается в управление бизнес-процессами. С другой стороны, чем выше степень функционального разделения сфер управления бизнесом компании (закупками, производством, маркетингом, продажами), тем более актуальной является межфункциональная логистическая координация.

Вопросы межорганизационной логистической координации также относятся к стратегическому уровню планирования. Они затрагивают отношения компании с ее поставщиками и логистическими посредниками, определяя конфигурацию логистической сети, ключевые показатели логистического плана, совместную информационную систему поддержки логистики в цепях поставок, распределение прибыли, рисков, ответственности между контрагентами ЛС.



С содержательной точки зрения координация предназначена для согласования индивидуальных целей и вариантов поведения отдельных объектов, при которых каждый объект улучшает или не ухудшает значение функции полезности, или система в целом улучшает качество решения общей задачи (если система имеет общую глобальную цель). В [4] сформулированы три базовых принципа координации в сложных многоуровневых системах. К ним относятся: 1) прогнозирование взаимодействий; 2) развязывание взаимодействий; 3) оценка взаимодействий.

Эти принципы принимают конкретную алгоритмическую форму в рамках выбранной математической модели и определенного способа их использования. Среди них наиболее известные алгоритмы координации базируются, например, на назначении и согласовании локальных показателей качества, оптимизация которых ведет к оптимизации глобального показателя, на распределении общего ресурса, согласовании значений общих переменных и др.

Особый методологический характер имеет координация в условиях конкуренции отдельных субъектов. Во многих организациях отдельные подразделения, так или иначе, конкурируют и каждое из них стремится максимизировать функцию полезности, полностью или частично игнорируя интересы других подразделений. Переход от управления отдельными логистическими функциями к интегрированному управлению логистическим процессом компании в целом связан с нарушением функциональных границ деятельности различных служб фирмы, вмешательством в области чужой ответственности, а потому чреват возникновением серьезных внутриорганизационных конфликтов.

Традиционное организационно-функциональное разделение бизнеса в компании (выделение структурных подразделений: производства, дистрибуции, продаж, маркетинга, закупок, финансов и т.п.) неизбежно приводит к возникновению между структурными подразделениями конфликтных ситуаций по параметрам, относящимся к логистике. Такими параметрами в большинстве случаев являются: объемы закупок продукции, объемы запасов в складской сети, продолжительность составляющих цикла выполнения заказа, бюджет на выполнение логистических функций и операций, параметры систем управления запасами, ассортимент закупаемой, хранимой и распределяемой продукции, показатели качества потребительского сервиса (надежность поставки, точность выполнения параметров заказа, доступность запасов) и т.п. Если в организационной структуре фирмы отсутствует отдел логистики, разрешение конфликтных ситуаций традиционно решается либо коллегиально (на оперативных совещаниях руководителей подразделений), либо директивным путем (распоряжением высшего руководителя, например, исполнительного директора или его заместителя). При наличии службы логистики разрешение указанных конфликтов может быть передано соответствующему логистическому менеджеру, ответственному за межфункциональную координацию.

Существуют различные варианты стратегий поведения субъектов для выходы из конфликта: конкуренция – прямое столкновение и использование силовых методов разрешения конфликтов; избегание – уход от борьбы, попытка представить ситуацию так, как будто конфликта нет вовсе; приспособление – признание поражения ради достижения каких-либо локальных (а иногда личных) целей; компромисс – обмен уступками для достижения приемлемого соглашения; сотрудничество – совместная работа для обоюдного удовлетворения интересов всех сторон.

Вместе с тем сложность современных логистических систем такова, что интегрированная система может охватывать несколько стран или регионов с большим количеством субъектов, и тогда всякое централизованное управление может быть невозможным. Также в некоторых случаях внутреннее устройство логистической системы может быть очень сложным и меняться непредвиденным образом, когда процессы динамично происходят в условиях неопределенности в пространстве и времени. Управление «сверху» в этих условиях также нереализуемо.

Информационно-логистические системы класса ERP по умолчанию предполагают решение задач без всякого вмешательства извне, но масштабируемость таких систем ограничена. При этом любая логистическая система находится в неопределенной внешней среде, которая как отдельный фактор должна обязательно учитываться при принятии управленче-

ских решений. Это приводит к проблеме невозможности эффективного управления и координации в больших логистических системах.

Решение проблемы находится в областях, отличных от классических подходов к управлению большими системами на основе централизованной координации и диспетчеризации. Именно поэтому в настоящее время активно развиваются исследования в области самоорганизующихся систем и принципов их построения. При этом в качестве прообразов используются примеры из области биологии, которые предоставляют относительно простые принципы и устойчивые решения для сложных задач.

Самоорганизация как самостоятельное явление или свойство изучается в теории систем, а также физике, химии, биологии, экологии, экономике, искусственных системах. Термин «само» означает, что «движущими силами» процесса являются «внутренние» процессы, в частности распределенные процессы локальных взаимодействий компонент системы.

Появление новых качеств у систем и дало основание присвоить этому свойству название эмерджентность. Английский термин «emergence» означает возникновение из ничего, внезапное появление, неожиданную случайность. Современные исследователи считают, что новые свойства возникают благодаря формированию конкретных связей между отдельными элементами. Другие связи придадут другие свойства, не обязательно проявляющиеся аналогичным образом.

Система проявляет эмерджентность, если на макроуровне в системе динамически возникают некоторые новые свойства, процессы (поведение, структура, паттерны, и т.д.), и эти процессы являются следствием локальных взаимодействий элементов системы на микроуровне, причем эти свойства невыразимы в терминах свойств микроуровня [5]. Для возникновения эмерджентности требуется соблюдение ряда условий: 1) наличие как минимум двухуровневой организации – микроуровень, где происходят локальные взаимодействия, и макроуровень, где проявляется эмерджентность; 2) нелинейность взаимодействия на микроуровне; 3) наличие обратной связи в локальных взаимодействиях на микроуровне; 4) состояние динамического равновесия, так как эмерджентность существует, пока происходят взаимодействия на микроуровне;

В логистических системах эмерджентность приводит к появлению так называемых интегративных свойств [5], которые формируются при согласованном взаимодействии элементов объединенных в структуру, которыми систем до этого не обладала. Интегративные свойства отличают систему от простого конгломерата и выделяют систему из среды в виде целостного образования.

Изучение понятия эмерджентность в самоорганизующихся системах естественным образом выводит на понятие синхронизации как одного из наиболее эффективных примеров проявления механизмов самоорганизации. Синхронизация рассматривается как явление, возникающее в процессе информационного взаимодействия нескольких объектов обладающих циклической динамикой и проявляется в согласованном изменении параметров взаимодействующих процессов.

Эффект от синхронизации применительно к логистическим системам проявится в более полном и совершенном учете и употреблении информации в планировании и управлении, за счет использования способностей к взаимодействию различных экономических подсистем имеющих циклическую динамику в изменяющихся условиях функционирования, с учетом глобальных целей всех взаимодействующих подсистем. Исследование этого явления позволяет разработать теорию управления процессами самоорганизации в социально-экономических системах.

Перспективы использования синхронизации в логистике достаточно широки. Так, если рассматривать одно из ключевых понятий и целевых принципов логистики, известное как правило 7R или логистический микс: «the right product, in the right quantity and the right condition, at the right place, at the right time, for the right customer, at the right cost», что можно пере-

вести как «обеспечение нужного продукта в требуемом количестве и заданного качества в нужном месте в установленное время для конкретного потребителя с наилучшими затратами» [1]. Цель логистической деятельности считается достигнутой, если эти семь условий выполнены, т.е. нужный товар необходимого качества в необходимом количестве доставлен в нужное время в нужное место с минимальными затратами. Ключевым понятием в данном принципе является слово «right» (правильный, нужный) для определенной характеристики (место, время, качество, количество, потребитель) что можно трактовать, как соответствующий или, в более расширенном смысле, синхронный. Очевидно, что именно принцип синхронизации по различным параметрам, лежит в основе логистического микса и именно степень синхронизации во времени и по другим характеристикам логистических потоков и процессов определяет эффективность выполнения логистических операций.

Аналогичная логика прослеживается, если рассматривать определения понятия логистика. Логистика – новое направление научно-практической деятельности, целевой функцией которого является сквозная организационно-аналитическая оптимизация экономических потоковых процессов [6]. Логистика – наука об управлении материальными потоками, связанной с ними информацией, финансами и сервисом в определенной микро-, мезо- или макроэкономической системе для достижения поставленных перед нею целей с оптимальными затратами ресурсов [1].

Ключевым положением во всех определениях является направленность логистики на управление потоками. Вместе с тем, обеспечение эффективного управления взаимодействием потоков невозможно без их синхронизации – приведения в соответствие управляемых параметров потоков к точно определенному моменту времени.

Нами предложены ряд естественных критериев для первичной классификации проявления синхронизации в логистических системах в зависимости от конкретных решаемых задач по описанию функционирования логистических систем. На первый план в предлагаемой классификации выдвигаются различные аспекты синхронизации.

Синхронизация в общем виде для логистики состоит в приведении двух или нескольких логистических процессов к синхронности, т. е. к такому их протеканию, когда одинаковые или соответствующие элементы процессов совершаются с неизменным сдвигом по фазе друг относительно друга. Например, к моменту пересечения логистические потоки различных видов должны иметь параметры, которые обеспечивают их взаимодействие и необходимую трансформацию.

В зависимости от синхронизируемого параметра можно выделить следующие виды синхронизации: 1) по времени обеспечивает точный момент во времени возникновения потока, согласованность движения нескольких потоков и определяет момент взаимодействия потоков друг с другом; 2) по объему обеспечивает соответствие объемных показателей взаимодействующих потоков; 3) по качеству определяет, что поступивший материальный поток обладает необходимыми качественными показателями и может взаимодействовать с другими потоками; 4) в пространстве обеспечивает возникновение и получение потоков в нужном месте.

По критерию отношения к логистической системе синхронизация может быть внутренняя и внешняя: 1) внутренняя определяет способность логистической системы обеспечивать синхронность взаимодействия потоков без внешнего вмешательства; 2) определяет способность системы обеспечивать синхронность потоков, но при этом необходима команда извне системы, например, системы управления верхнего уровня или вмешательство человека для перенастройки системы.

В более широком смысле, рассматривая синхронизацию как способ управления на основе синергетической концепции, в логистических системах различного уровня могут быть выделены следующие виды синхронизации: 1) интересов, которая проявляется на уровне элементов логистической системы (отдельных ее субъектов) и определяет условия протекания логистических процессов, которые удовлетворяют целям всех участников, максимизируя

их общую выгоду; 2) взаимодействие описывает процессы синхронизации на уровне отдельных логистических систем, которые вступают во взаимодействие, и обеспечивается согласованием параметров входящих и выходящих потоков различного вида.

Обобщая проведенные исследования, следует отметить, что для организационных процессов характерно наличие управляющего субъекта, инициирующего структурообразующие процессы на основании рационального суждения, осуществляющего этот проект посредством программ, регламентов, переговоров, организационного контроля. Стремление к формализации, формальному закреплению порождаемых структур, является одной из основных сторон такой стратегии. В рамках организационных процессов для логистического администрирования используются методы координации, ориентированные на согласование отдельных целей и вариантов поведения субъектов, при которых каждое звено системы улучшает или не ухудшает значение своей функции полезности, но при этом ЛС в целом ориентирована на достижение общей глобальной цели.

Для самоорганизационных процессов характерны: спонтанность, неожиданность структурных образований. Этим обеспечивается гораздо большее разнообразие возможных состояний управляемой системы и, как следствие, значительно более высокий консолидирующий потенциал именно самоорганизационной составляющей в процессах социально-экономического упорядочивания. Для логистического администрирования в данном случае можно использовать способность логистических процессов к синхронизации своего поведения.

Оба указанных процесса можно объединить и исследовать в рамках единой концепции современного управления экономикой, предполагающей резонанс организационных и самоорганизационных процессов, их согласованность на основе как координации, так и синхронизации. В результате экономическая система может иметь эффективную регуляцию, а также использовать внутренние механизмы изменения качества своего экономического развития.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сергеев В.И. Корпоративная логистика : 300 ответов на вопросы профессионалов / В.И. Сергеев. М.: ИНФРА-М, 2005. 976 с.
2. Бауэрсокс Д. Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок / Д. Дж. Бауэрсокс. М.: Олимп-Бизнес, 2008. 635 с.
3. Сток Дж.Р. Стратегическое управление логистикой: пер. с англ. / Дж.Р. Сток, Д.М. Ламберт. 4-е изд. М.: ИНФРА-М, 2005. 797 с.
4. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. М.: Мир, 1973, 344 с.
5. Миротин Л.Б. Системный анализ в логистике : учебник / Л.Б. Миротин, Ы.Э. Ташбаев. М.: Экзамен, 2004. 480 с.
6. Семенов А.И. Логистика. Основы теории / А.И Семенов, В.И. Сергеев. СПб.: Союз, 2003. 544 с.

#### **Трегубов Владимир Николаевич –**

кандидат экономических наук, доцент кафедры «Организация перевозок и управление на автомобильном транспорте» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

УДК 004.048

**И.Ю. Квятковская, В.Ф. Шуршев, К.И. Квятковский****ИНТЕГРИРОВАННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

*Рассматриваются перспективы создания информационного пространства коллективного пользования для субъектов регионального кластера, вовлеченных в поддержку основного бизнес-процесса. Разработана информационная модель кластера с использованием трех доменов. Предложены механизмы сопровождения процессов аккумуляции знаний жизненного цикла регионального кластера. Дана оценка адекватности информационной модели современным объектно-ориентированным моделям знаний.*

Кластер, домен, семантическая модель, информационный объект

**I.J. Kvyatkovskaya, V.F. Shurshev. K.I. Kvyatkovskiy****THE INTEGRATED MECHANISMS OF INFORMATION SUPPORT OF DECISION-MAKING OF THE LARGE-SCALE TERRITORIAALLY-DISTRIBUTED ECONOMIC SYSTEM**

*Prospects of creation of information field of collective using for subjects of regional cluster, involved in support of the basic business process are considered. The information model of cluster with use of three domains is developed. Mechanisms of support of processes of accumulation of knowledge along life cycle of regional cluster are offered. The estimation of adequacy of information model is given modern object-oriented models of knowledge.*

Cluster, the domain, semantic model, information object

В настоящее время широко используется кластерный подход к сегментированию региональной экономики в целях достижения глобальной цели – получения максимальной прибыли, способствующей развитию региона в целом. Формирование и развитие кластеров как общероссийских, так и региональных, отвечает как макропотребностям общенациональной экономики, так и микропотребностям предпринимательских кругов. Создание кластеров необходимо для организации взаимодействия в обслуживании одного или нескольких бизнес-процессов (БП), объединенных горизонтальной иерархией внутренних и зависимых между собой функциональных действий.

Для управления кластером характерна дивизиональная структура [1], обеспечивающая наибольшую демократизацию управления, отличающаяся от жесткого управления в структурах, подобных кластерам: холдингам, корпорациям и т.п. Она основана на соответствии крупных самостоятельных производственно – хозяйственных подразделений отдельным уровням управления, и передаче этим уровням ответственности за получение прибыли. Недостатком такой структуры является дублирование функций, выполняемых каждым подразделением. Формирование кластера происходит на базе одного или нескольких крупных предприятий одной отрасли, конкурирующих на глобальном рынке, вокруг которых кооперируются предприятия сферы услуг, поставщиков сырья, финансовые институты и организа-

ции, научно-исследовательские организации, учебные заведения, администрации регионов, профессиональные и общественные организации. Важнейшую роль в кластерах играют сетевые институты, организующие взаимодействие субъектов кластера между собой, способствующие формальному и неформальному обмену знаниями, сотрудничеству между организациями с взаимодополняющими активами и профессиональными навыками. Укрепление связей внутри кластера с использованием современных логистических и информационных технологий способствует появлению новых способов производства продукции или услуг, основанных на взаимодополняющих навыках по поддержке основного и сопутствующих бизнес-процессов. Стратегия развития кластера связана с созданием условий для его функционирования, одним из которых является создание мощной инфраструктуры, как производственной, так и инфокоммуникационной. Конкурентоспособность кластера достигается синергетическим эффектом от внедрения унифицированного подхода в сфере качества, логистики, инжиниринга, информационных технологий.

Однако сегодня недостаточно исследований по созданию информационно-управляющих систем для кластера, процесс информатизации которого сводится к технологическому обеспечению единого информационного окна, поддерживающего логистическую координацию основного бизнес-процесса. Наличие слабоструктурированных связей экономического характера, увеличение сложности и новизны задач управления в условиях недостаточности информации, стохастичность воздействия окружающей среды увеличивают фактор неопределенности в принятии управленческих решений.

Целью данной статьи является разработка интегрированных механизмов информационной поддержки процессов принятия решений, способствующих повышению эффективности функционирования крупномасштабной территориально-распределенной экономической системы.

Системный анализ объекта исследования позволяет охарактеризовать его как класс объектов управления со следующими признаками:

1. Наличие большого количества взаимосвязанных элементов, взаимодействующих между собой. Если для системы элементом является простейшей неделимая ее часть, то для кластера может существовать множество вариантов декомпозиции по определенному признаку.

2. Сложность выполняемой функции для достижения цели функционирования, основанной на достижении группы промежуточных целей. Наличие двух типов целей, первая из которых связана с повышением эффективности сквозного бизнес-процесса, вторая – с повышением эффективности работы кластера, как целостной системы элементов.

3. Наличие множества целевых задач, построенных на единой инвариантной модели предметной области (ПрО). К подобным задачам могут относиться задачи тактического, стратегического и суперстратегического управления регионального кластера (РК).

4. Наличие дивизиональной структуры управления, качество которого во многом зависит от степени централизации, изменяемой в зависимости от сложности, вида, объема решаемых задач. Для кластера не характерна иерархичность в управлении.

5. Наличие большого числа информационных потоков, обрабатываемых гетерогенными информационными системами, в большинстве своем не взаимодействующими между собой, позволяющими получать и обрабатывать информацию как от внешней среды, так и от элементов кластера, на основании которой можно выработать управляющее решение. При обслуживании сквозного БП наблюдается увеличение мощности информационных потоков, проявляющееся при обмене данными с вышестоящими органами, когда происходит передача сводных отчетов, которые формируются низовым органом на основании первичной информации.

6. Функционирование под воздействием большого числа случайных факторов, взаимодействие с внешней средой, в процессе которого могут происходить отклонения от нормального режима работы вследствие возмущающих факторов, возникающих как внутри системы, так и за ее пределами. Подобная ситуация не выводит из строя систему целиком, но

существенно снижает эффективность ее функционирования. Для РК характерно включение внешней среды в систему.

7. Наличие топологически сложной организационной структуры, возможность деления на подсистемы. Для кластера деление на подсистемы может являться условным – например, в агропромышленном кластере можно выделить производителей овощей, мясомолочной продукции, рыбы и т.д., в транспортном – грузоотправителей, грузополучателей, перевозчиков и т.д. Главное требование – чтобы цели функционирования подсистем не противоречили главной цели функционирования кластера – системы. Особенностями РК является несколько способов структуризации.

8. Изменение состава кластера в процессе его функционирования.

Жизненный цикл РК включает следующие этапы [2]: 1) формирования, на котором происходит вовлечение участников в состав кластера. Формирование происходит централизованно, сверху вниз; 2) становления, на котором определяются производственные циклы, идентифицируются совместные бизнес-процессы, ресурсы, мощности, взаимосвязи. Предполагает централизованное управление сверху; 3) стабильного функционирования, на котором достигается договорной компромисс среди участников. Формирование согласованной стратегии развития кластера на базе объектных стратегий; 4) развитого функционирования, связанного с созданием внутренней среды. Характеризуется формированием формальных и неформальных норм, правил, традиций, регламентирующих поведение и взаимоотношение участников кластера.

Современные способы управления предприятиями широко используют в организационных процессах информационные системы, обеспечивающие либо информационное взаимодействие между структурными подразделениями, либо сопровождающие бизнес-процессы предприятия. Одним из модулей подобных систем является модуль поддержки принятия решения, позволяющий оценить результативность деятельности организации под различными углами зрения. Использование подобных систем в типовом варианте для интеграции деятельности субъектов кластера и построения механизмов принятия решения вызывает ряд проблем:

1) семантическая неопределенность, возникающая вследствие отсутствия системы соглашений о ПрО, обеспечивающей одинаковое понимание всеми субъектами кластера применяемых для решения задач управления терминов, их спецификаций, атрибутов и отношений между ними;

2) гетерогенность информационной среды, вызванная тем, что в кластеры объединены предприятия как основной производственной отрасли, так и сопутствующих отраслей, имеющие различные предпочтения в выборе прикладного программного обеспечения и тезаурусе описания бизнес-процессов, что порождает и затрудняет создание единого информационного пространства, поддерживающего деятельность кластера;

3) географическая распределенность субъектов кластера, для которых необходимо обеспечение логистического обслуживания технологических цепочек производства товаров и услуг с учетом их территориальных признаков и особенностей, пространственных характеристик;

4) отсутствие количественных критериев, не позволяющих оценить в комплексе результативность деятельности кластера по таким показателям, как административная, информационная, научная и технологическая инфраструктура; отсутствие единого подхода к формированию комплексного показателя оценки деятельности кластера;

5) несовершенство организационно-правовой формы деятельности субъектов кластера, отсутствие иерархической соподчиненности, и, как следствие, построение принципов управления кластером на основе механизмов кооперативного принятия решений.

В совокупности перечисленные проблемы делают кластер одним из сложнейших объектов информатизации. Выходом из создавшегося положения является создание единого информационного пространства регионального кластера, построенного на следующих принципах:

Принцип системной интеграции, позволяющий оценить кластер как единый комплекс взаимосвязанных компонентов, представляющий собой подсистему макросистемы более высокого порядка, взаимодействующий с внешней средой под действием объективных экономических законов. Следствием данного принципа является необходимость интеграции информационных систем (ИС), имеющая программно-технический, функциональный и информационные аспекты.

Когнитивный принцип приобретения, создания, аккумуляции и хранения знаний о процессах жизненного цикла кластера, включающий семантический принцип консолидации знаний о предметной области, связанной с деятельностью кластера, выраженной как на естественном, так и на искусственном языке, использующий онтологический подход.

Пространственный принцип в решении задачах управления составляющими кластера, реализуемый геоинформационными системами.

Принцип консолидации решений в различных задачах управления кластером, основанный на кооперативном и процессном подходе к принятию решения. Разрабатываемый формальный аппарат, используемый для концептуализации ПрО, должен быть использован для решения любых задач управления. Показателем эффективности работы кластера должен стать обобщенный показатель, учитывающий степень приспособленности кластера к выполнению поставленных перед ними задач.

Принцип масштабирования информации, сохраняющий мощности информационных потоков при обмене информации внутри кластера как между горизонтально, так и вертикально ориентированными уровнями, одновременно сохраняющий объем информационных баз и мощностей вычислительных средств различных уровней системы.

Концепция создания информационной системы управления региональным кластером с учетом жизненного цикла должна включать этапы, сопровождаемые эволюцией экономического, информационного и когнитивного уровней (рис. 1):

Этап 1. Инвентаризация существующих знаний о бизнес-системах и сквозных БП кластера. Назначение главного сквозного бизнес-процесса, обслуживание которого потребовало создание кластера. Аудит существующих БП, ИС и информационных ресурсов (ИР), принадлежащих участникам, типовых регламентов взаимодействия, измерения направления и интенсивности информационных потоков.

Этап 2. Создание базы знаний об объектах, процессах и средах РК с использованием онтологического и пространственного принципов. Создание моделей данных о бизнес-процессах РК, его участниках, бизнес-системах. Онтологический инжиниринг позволит построить всевозможные таксономии, включая таксономии участников и контрагентов, создать унифицированные классификаторы и справочники, отвечающие классификационным требованиям в этой задаче. Семантические модели позволят точнее интерпретировать смысл терминов, присутствующих в поисковых запросах, сокращая возможную неполноту ответа на него. Принцип обработки данных обеспечит семантическую интероперабельность информационных ресурсов, необходимую для выполнения последующих этапов. Обязательным условием поддержки атрибутивной онтологии является внедрение пространственных принципов обработки данных на базе геоинформационных систем.

Этап 3. Формирование единого семантически операбельного информационного пространства РК. Создание информационного пространства коллективного пользования, для которого на остальных этапах происходит наращивание его функциональности, расширение набора интерактивных сервисов и их возможностей, масштабирование транзакционности процесса обработки информации.





Рис. 1. Жизненный цикл РК

Этап 4. Организация информационного взаимодействия между субъектами кластера: 1) интеграция участников в рамках типовых схем организации БП; 2) интеграция участников для достижения конкурентоспособности кластера.

Этап необходим для информационной поддержки основной технологической цепочки выпуска продукции. На этапах формирования и становления кластера информационная поддержка горизонтального взаимодействия участников технологического процесса сопровождается типовые технологические схемы, логистические цепочки. Для развитого, стабильно функционирующего кластера, информационная поддержка необходима для объединения интересов участников для достижения глобальной цели.

Этап 5. Создание систем мониторинга сквозных бизнес-процессов, мониторинга качества работы бизнес-систем. Унификация показателей и формирование количественной и качественной оценки эффективности технологического процесса, реализуемого в зоне кластера, на основе данных, полученных путем мониторинга систем горизонтального и вертикального взаимодействия. При создании систем мониторинга актуальны не только индикаторы состояния составляющих этого процесса – жесткие факторы, но и мнение конечного потребителя, общества, получаемое путем социологического опроса, – т.н. мягкие факторы.

Этап 6. Формирование организационно- технической иерархии для мониторинга деятельности кластера в целом. Построение оптимальной структуры управления, использующей ситуационные принципы. Ситуационное управление позволит определить уровни дерева, определяющие соподчиненность нижестоящих уровней.

Этап 7. Формирование стратегии управления кластером с использованием средств программно-алгоритмической поддержки. Появление унифицированных индикаторов, алгоритмов, методов и процедур, позволяющих выполнять поддержку формирования управленческих решений как для отдельных бизнес-систем, так и для всего кластера в целом.

Этап 8. Создание корпоративного знания о РК на базе метаонтологии. Формирование т.н. институциональной среды РК, включающее создание электронных архивов, электронных хранилищ документов, электронных коллекций. Метаонтология должна быть ядром системы знаний, основанной на хранении базовых структур, используемых при автоматическом анализе и индексации текстов документов. Ориентация метаонтологии на предметно-

ориентированную лексику позволит эффективно применять семантически-ориентированные методы поиска информации.

К основным субъектам, функционирующим в едином информационном пространстве, отнесены, наряду с хозяйствующими субъектами, организации политической, финансовой, социальной инфраструктуры. К ним также относятся организации, обслуживающие информационную инфраструктуру кластера, а также обеспечивающие его связь с внешней средой: провайдеров, операторов связи, логистические центры и т.п. Одной из форм, способствующих объединению этих предприятий в единую хозяйствующую систему, является сетевая организация или виртуальный кластер – информационная модель реального кластера, содержащая информацию обо всех его составляющих и связей между ними, необходимую для организации бизнес-процессов внутри кластера [3, 4].

Виртуальный кластер содержит три уровня – домена: физический, информационный, когнитивный. Особенностью представления доменной модели виртуального кластера является циклический процесс обмена информацией и знаниями между доменами для формирования управленческих решений.

В физическом домене реально существуют и функционируют реальные физические объекты, продуктом жизнедеятельности которых являются материальные, финансовые и энергетические потоки, формализуемые путем представления в виде бизнес-процессов. В зоне физического домена определены субъекты, имеющие отношения к процедурам формирования управленческих решений: лицо принимающее решение (ЛПР), владельцы проблемы, инженеры по знаниям (когнитологи), эксперты в отдельных ПрО. Практика показывает, что в процессе принятия решений их функции могут объединяться: ЛПР может являться одновременно владельцем проблемы; ЛПР, выступая одновременно как эксперт, становится менеджером-экспертом.

В информационном домене действуют информационные аналоги объектов и процессов, существующие в информационных ресурсах, системах, хранилищах данных в виде структурированных данных или сообщений, – информационные объекты (ИО). Их характеризуют свойства-характеристики и свойства-связи: первые описывают объект, принимая в качестве значений данные определенных типов, вторые ассоциируют объекты друг с другом, принимая в качестве своих значений сами объекты. Свойства ИО представимы в структурированном и неструктурированном виде, для них характерны глобальные и локальные ограничения.

В когнитивном домене происходит анализ, мониторинг и систематизация знаний, аккумулирующихся в информационном домене с целью выработки управленческого решения для передачи его в физический домен. Источниками информации для него являются агрегированные данные и сообщения, передаваемые из информационного домена, и когнитивные знания о процессах, явлениях и способах управления из физического домена.

Предлагается механизм хранения знаний, сочетающий онтологии, продукционные правила и фреймовые структуры, использующий предложения профессора А.А. Большаковым по синтезу интеллектуальных организационно-технических систем [5]. В когнитивном домене аккумулируется информация о следующих основных категориях знаний:  $\Theta$  – знания о совокупности объектов кластера (ПрО), характере их поведения в процессе управления и смене состояний;  $\Xi$  – знания о процедурах принятия управленческих решений как совокупности формализованных методов и эвристик;  $\mathcal{Z}$  – знания о целях управления, целевых функциях и критериях. В общем виде структура знаний о РК представляет собой фрейм  $F = (\Theta, \Xi, \mathcal{Z})$  с тремя субфреймами, при этом знания о ПрО представляются с помощью семантических или фреймовых моделей представления знаний, широко используемых в последнее время, так как наиболее адекватно отражают реальный мыслительный процесс человека. Знания относительно процедур принятия решений представимы в виде продукционных моделей или присоединенных процедур фреймов.

В общем виде субфреймы когнитивного домена содержат следующую информацию: знания о совокупности объектов кластера  $\Theta = \{O_{Main}, O_{PR}, FrT\}$ ; знания о процедурах принятия управленческих решений  $\Xi = \{O_{Proc}, O_z, FrK, FrProd\}$ ; знания о целях управления, целевых функциях и критериях  $\mathcal{Y} = \{O_{PR}, FrStr\}$ .

Структуру фреймовых моделей [6] образуют: *FrT* – *фрейм технологии*, необходимый для описания процедурных знаний о протекании процессов в РК, включающий описание ролей (обязанностей и регламентов) и сценариев (поведения объекта) (например, для транспортного кластера – знания о технологических режимах грузоперевалки, механизмах оценки качества, алгоритмах прохождения таможенного досмотра и т.п.); *FrK* – *фрейм конфликтности*, описывающий ситуации отклонения от нормальных режимов: причины, приводящие к их появлению, способы обнаружения нетипичных ситуаций и способы их локализации; *FrProd* – *фрейм продукции*, описывающий причинно-следственные связи, необходимые для достижения конечного результата – цели управления; *FrStr* – *фрейм структуры*, описывающий структуру тех понятий и показателей, которыми описывается данный процесс в объекте управления и конечный результат воздействия на него самой системой.

Структуру онтологий образуют [7]: *O<sub>Main</sub>* – *метаонтология* кластера, инвариантная относительно составляющих ПрО, синхронизирующая общую структуру понятий когнитивного домена: объект, показатель, свойство и др. (интенциональный аспект); *O<sub>PR</sub>* – совокупность предметных онтологий, определяющих понятия, характерные для одной ПрО: типы отношений, декларативные и процедурные интерпретации понятий и отношений; *O<sub>z</sub>* – онтологии задач, определяющие процедуры, имеющие структуру, подобную структуре понятий в предметной онтологии (в т.ч. декомпозиция задач на подзадачи при помощи декларативных интерпретаций); *O<sub>Proc</sub>* – онтология методов решения задач, слотами которой могут быть фрагменты базы знаний, выражающие любым формальным способом порядок переноса и агрегирования информации, структурированное представление входной информации, тип входных данных, множество алгоритмов, процедур, способов анализа, агрегирования, категоризации индикаторов, расчета интегрального показателя. Концепты или понятия ПрО формируются из информационного или физического домена и представляют собой набор однородных групп, будь то ИО или их характеристики, а также события, факты, явления. Концепты могут использоваться в уникальном виде, либо являться классами, абстрагирующимися от конкретных объектов.

Для каждого из трех доменов характерны следующие свойства (таблица):

Виртуальный кластер

	Объекты	Процессы
Физический домен	Реальный объект, функционирующий в материальном пространстве	Материальные, финансовые, энергетические потоки между участниками кластера
Информационный домен	Информационный объект, имеющий свойства-связи или свойства-характеристики	Информационные системы, реализующие модели бизнес-процессов
Когнитивный домен	Знания об объектах и их свойствах в форме предметных онтологий	Знания о процессах в виде фреймов и продукций
	Знания о прямых и обратных задачах принятия решения Знания о методах решения прямых и обратных задач	

Предложенная концепция информационной модели РК не противоречит структуре объектно-ориентированной модели знаний, имеющей широкое применение в проектировании корпоративных информационных систем. Для оценки адекватности модели виртуально-

го кластера со стандартом модели MDA консорциума OMG [8] сравним концептуальные уровни типовой модели и информационной модели виртуального кластера (рис. 2):

Уровень 4L-M0 – данные об объектах моделируемой ПрО, образующие универсум объектный классификатор: данный уровень отождествляется с универсумом, содержащим полный перечень сведений об объектах, процессах, средах физического домена, в котором объединяются данные об объектах, принадлежащих отраслевым группам кластера, либо объединенных единым БП.

Уровень 4L-M1 – модели, следующие описанию объектов ПрО на уровня 4L-M, соответствующие определенной точке зрения на ПрО: информационная модель РК содержит на данном уровне модели объектов и процессов в предметных областях, составленные m экспертами по знаниям. Область представления – информационные системы, информационные ресурсы, базы данных, базы знаний.

Уровень 4L-M2 – метамодели, определяющие способы описания моделей уровня 4L-M1: метамодели объектов в виде информационного и когнитивного доменов: данному уровню соответствует метамодель информационного домена, описывающая структуру информационной среды и способы интеграции информационных систем, и метамодель когнитивного домена – интегрированные знания экспертов различных ПрО.

Уровень 4L-M3 – метаметамодел, не зависящая от области интересов, определяющая способы построения метамodelей уровня 4L-M2: в нашем случае это уровень, на котором построена модель управления информационным и когнитивным доменами, использующая метаонтологию кластера, являющуюся ядром системы знаний, фиксирующую базовые структуры, используемые при автоматическом анализе и индексации текстов документов.

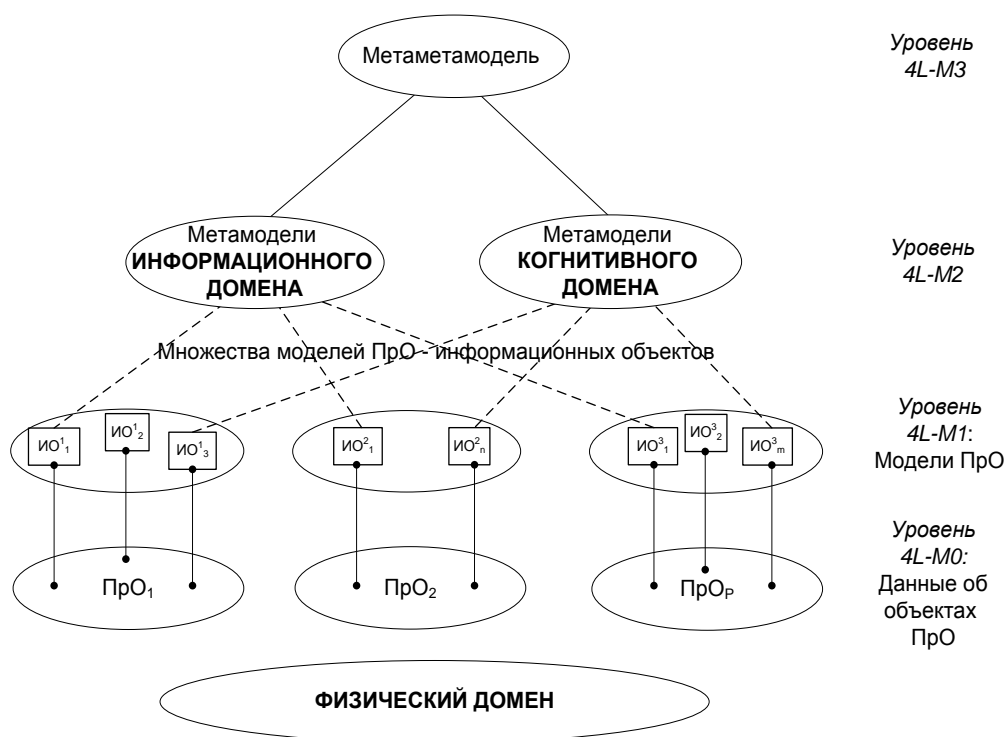


Рис. 2. Структура информационной модели виртуального кластера, выполненная в соответствии со стандартом MDA

Расширением данной модели может быть класс специальных моделей знаний объединяющий модели, отражающие особенности представления знаний и решения задач в отдельных, относительно узких ПрО.

В заключение предлагаются следующие выводы.

Системный анализ объекта информатизации – регионального кластера – обозначил проблемы и барьеры, возникающие при создании комплексных средств программно-алгоритмической поддержки основного бизнес-процесса.

В целях их устранения предложена информационная модель, выражающая объект регионального экономического пространства в форме трехуровневой доменной модели. Проведена оценка адекватности информационной модели типовой объектно-ориентированной модели знаний.

Детализовано представление когнитивного домена информационной модели, управляющего знаниями об основном бизнес-процессе кластера, повышающего эффективность горизонтального и вертикального взаимодействия субъектов информационного пространства РК.

Полученные результаты могут быть применены для проектирования информационных моделей сетевых организаций, обеспечивающих предоставление электронных услуг.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Математические модели организаций : учеб. пособие / А.А. Воронин, М.В. Губко, С.П. Мишин, Д.А. Новиков. М.: ЛЕНАНД, 2008. 360 с.
2. Клейнер Г.Б. Синтез стратегии кластера на основе системно-интеграционной теории / Г.Б. Клейнер, Р.М. Качалов, Н.Б. Нагрудная // Отраслевые рынки. 2008. №5-6(18) (Сентябрь-Декабрь).
3. Квятковская И.Ю. Концептуальная информационная модель регионального кластера / И.Ю. Квятковская // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 1. С. 55-59.
4. Рикарда, Б. Б. Строение организационного знания на виртуальных предприятиях / Рикарда Б. Боукен // Проблемы теории и практики управления. 2004. № 6. С. 80.
5. Большаков, А.А. Синтез интеллектуальных организационно-технических систем управления / А. А. Большаков // Вестник ТГТУ. 2004. Т.10. № 4а. С. 954-959.
6. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 268 с.
7. Квятковская, И.Ю. Использование онтологий для создания баз общих знаний при классификации информации о предметной области / И.Ю. Квятковская // Вестник АГТУ. 2007. № 4(39) (июль-август). С. 225-227.
8. Башмаков, А.И. Интеллектуальные информационные технологии: учеб. пособие / А.И. Башмаков, И.А. Башмаков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 304 с.

#### **Квятковская Ирина Юрьевна –**

доктор технических наук, директор института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

#### **Шуршев Валерий Федорович –**

доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы» Астраханского государственного технического университета

#### **Квятковский Кирилл Игоревич –**

аспирант кафедры «Информационные системы» Астраханского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

УДК 332.122

**О.В. Краснова**

### **РАЗВИТИЕ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ПРОЕКТОВ С УЧЕТОМ ОТНОШЕНИЙ ВЛАСТНЫХ СТРУКТУР И БИЗНЕС-ГРУПП РЕГИОНА**

*Описываются основные аспекты успешного территориального развития региона с учетом реализации инфраструктурных проектов на основе определения системы взаимоотношений властных структур и бизнес-групп региона, а также главных факторов привлекательности и риска развития региона.*

Инфраструктурные проекты, территориальное развитие региона, властные структуры, бизнес-группы региона

**O.V. Krasnova**

### **DEVELOPMENT OF INFRASTRUCTURAL PROJECTS TAKING INTO ACCOUNT RELATIONS OF POWER STRUCTURES AND REGION BUSINESS GROUPS**

*The description of the basic aspects of successful territorial development of region taking into account realization of infrastructural projects at the expense of definition of system of mutual relations of power structures and region business groups, and also major factors of appeal and risk of development of region is given.*

Infrastructural projects, territorial development of region, power structures, region business groups

На сегодняшний момент остро стоит проблема инвестирования инфраструктурных проектов развития регионов РФ. Усилия российского правительства могут быть плодотворными при активном участии в этих проектах представителей малого и среднего бизнеса. Они же тщательно изучают возможность дальнейшего развития своего бизнеса в регионе. В этом поможет проведение предынвестиционных исследований, которые, в свою очередь, должны учитывать состояние внешней среды организаций региона, а именно факторы привлекательности и риска развития региона. К факторам привлекательности региона можно отнести:

1. Конкурентный федерализм. Его особенность заключается в наличии у региона наиболее привлекательных условий для ведения бизнеса, а именно благоприятная налоговая политика региона, наличие ресурсной базы или перерабатывающих производств, выгодных цен на землю и т.д. Эти условия заранее обговариваются между властями и бизнес-группами.

2. Инфраструктура. Залогом привлекательности для внешних инвесторов является степень развития инфраструктуры региона [1].

3. Динамика ВРП. Так как валовой региональный продукт определяется в текущих основных и рыночных ценах, а также в сопоставимых ценах, инвесторы будут учитывать динамику этих цен за конкретные периоды и по сравнению с другими регионами.

4. Привлекательная сегментация спроса. Инвесторы будут учитывать сегментацию рынка для выявления повышенного спроса на позиционируемый продукт.

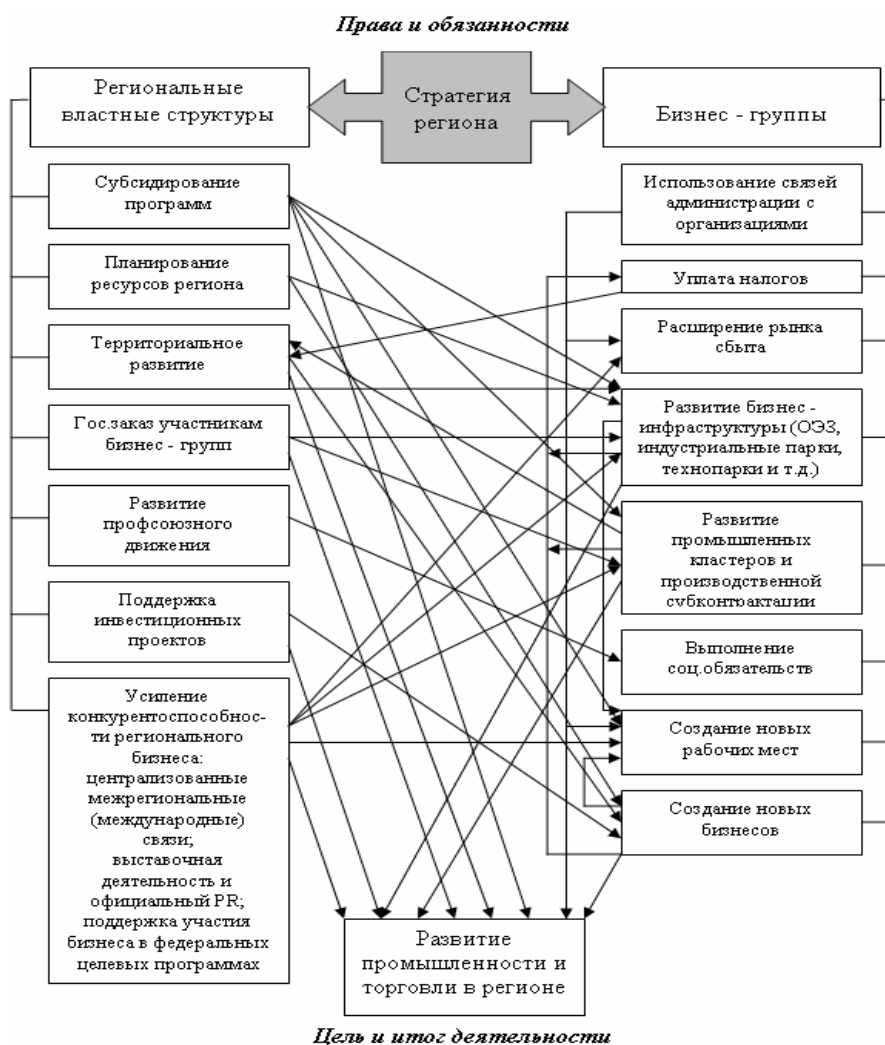
5. Низкая конкуренция. Она позволит расти бизнесу и, следовательно, получать большую прибыль.

6. Региональные программы развития/ поддержки отраслей. Они позволят содействовать развитию промышленных кластеров и производственной субконтракции.

К факторам риска развития региона можно отнести:

1. Природные катаклизмы, экологические проблемы. Они могут стать постоянной «статьей затрат» для региональных властей и многих бизнесменов.
2. Отсутствие мощной образовательной и научной базы ставит под угрозу развитие научно-производственной деятельности фирм региона с точки зрения кадровой и инновационной политики.
3. Неустойчивый рынок труда, демографическая характеристика региона. Отсутствие соответственного уровня демографии и/или факторов привлечения трудового ресурса в регион не способствует развитию кадровой политике многих организаций.
4. Транспортная доступность региона. Слабое транспортное сообщение с соседними регионами и странами негативно влияет на развитие многих видов бизнеса.
5. Уровень криминагенности региона. Фактор важен для спокойного развития различного рода бизнеса.
6. Ограничения по энергоснабжению не дадут в полном объеме использовать производственные мощности.
7. Недействующее законодательство не позволит использовать преимущества законодательной базы.

Далее, после проведения исследования факторов привлекательности и риска развития региона, необходимо учитывать систему взаимоотношений региональных властных структур и бизнес – групп, от которой зависит стратегия развития региона (см. рисунок).



Система взаимоотношений региональных властных структур и бизнес-групп

Как видно из рисунка, сложное сплетение прямых и косвенных связей, основанных на правах и обязанностях взаимодействующих сторон, приводят к главной цели и итогу их совместной деятельности – развитию промышленности и торговли в регионе.

Из рисунка также видно, что не последнюю роль в достижение желаемой цели играет территориальное развитие. Оно способствует развитию бизнес-инфраструктуры (особых экономических зон, индустриальных парков, технопарков и других региональных структур), потому что территория региона – это, прежде всего, экономическая составляющая, которая должна приносить доход, и нахождение на ней соответствующих социально-экономических систем является залогом процветания. Инфраструктурные проекты в этом случае позволяют, с учетом федеральных интересов, скорректировать приоритеты.

Развитие промышленных кластеров и производственной субконтракции позволяет привлечь большой поток инвестиций, как государственных, так и частных, что также способствует территориальному развитию региона.

Логическим продолжением развития бизнес – инфраструктуры, а также промышленных кластеров и производственной субконтракции может стать создание новых бизнесов, которые позволят увеличить сбор налогов в региональную казну и, как следствие, также развивать территорию региона.

Создание новых малых и средних бизнесов также могло бы обеспечить реализацию на конкурсной основе инфраструктурных проектов за короткий срок, качественно и с минимальными затратами для федерального и регионального бюджетов.

Несмотря на сегодняшнее состояние экономической нестабильности, благодаря инфраструктурным проектам развитие регионов могло бы приобрести устойчивый и долгосрочный характер.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Краснова О.В. Региональные аспекты взаимодействия бизнес-групп и власти при использовании стратегии интеграции, с целью повышения эффективности стратегического управления организаций региона / О.В. Краснова // Тенденции развития взаимосвязи глобальных и региональных аспектов устойчивого развития : матер. Всерос. науч.-практ. конф. Саратов: СГТУ, 2010.

**Краснова Оксана Вячеславовна** – ассистент кафедры «Менеджмент, коммерция и право» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

УДК 332

**О.А. Полумордвинов**

#### **ОРГАНИЗАЦИОННО - ЭКОНОМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕСТИЦИЯМИ В СФЕРЕ ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

*Система программных мероприятий, разработанных и направленных на реализацию стратегической задачи обеспечения комфортным, что уже присутствует и самое главное, доступным жильем граждан Астраханской области реализуется в рамках комплексных программ. За счет стимулирования жилищного строительства, модернизации строительной индустрии,*



*совершенствования нормативно-правовой базы, организационно-экономических мероприятий планируется доведение индекса доступности до среднероссийских показателей уже к 2015 году.*

Целевая программа, доступное жилье, правовая база, показатель доступности

**O.A. Polumordvinov**

## **ORGANIZATIONAL-ECONOMIC MECHANISM OF MANAGEMENT OF INVESTMENTS INTO HOUSING CONSTRUCTION SPHERE**

*The system of the program actions, developed and directed on realization of a strategic problem of maintenance comfortable that already is present also the most important thing, by accessible habitation of citizens of the Astrakhan region is realized within the limits of complex programs. At the expense of stimulation of housing construction, modernization of the building industry, perfection it is standard – legal base, organizational – economic actions finishing of an index of availability to indicators of Russia by 2015 is planned/*

The target program, accessible habitation, legal base, availability indicator

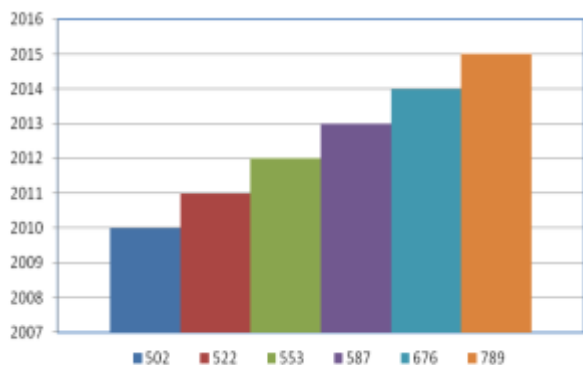
Общей целью национального проекта формирование рынка доступного жилья является обеспечение комфортных условий проживания граждан. Основные цели ФЦП «Жилище» – формирование рынка жилья эконом – класса, отвечающего требованиям энергоэффективности и экологичности выполнения государственных обязательств по обеспечению жильем категорий граждан, установленных федеральным законодательством.

Инструментом реализации поставленных целей на территории региона стала разработанная программа «стимулирования развития жилищного строительства в Астраханской области на 2011-2015 гг.», направленная на: 1) обеспечение ежегодного роста объема ввода жилья; 2) развитие направление строительства жилья, доступного для широких слоев населения; 3) формирование условий для стимулирования инвестиционной активности в жилищном строительстве и прежде всего в части реализации проектов комплексного освоения и развития территории; 4) развитие базы промышленности строительных материалов с учетом внедрения энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий, материалов, решений; 5) снижение административных барьеров в строительстве; 6) стимулирование частной инициативы граждан; 6) выполнение социальных гарантий по поддержке граждан при приобретении жилья и улучшении жилищных условий; 7) создание условий для развития ипотечного жилищного кредитования и деятельности участников рынка ипотечного жилищного кредитования.

Реализация поставленных задач должна осуществляться только в комплексе совершенствованием нормативно-правовой базы, организацией финансирования капитальных и прочих расходов за счет федерального бюджета, бюджета Астраханской области, местных бюджетов и внебюджетных источников. За прошедший период (2006-2009 гг.) в ходе реализации всех вышеупомянутых программ и источников финансирования объем ввода жилья в регионе составил 2255 тыс. м<sup>2</sup>, а жилищная обеспеченность на одного жителя выросла с 19,6 м<sup>2</sup> до 20,4 м<sup>2</sup>. Объем выдаваемых ипотечных кредитов и займов составил 5 924 млн. рублей. Почти 6 тыс. семей улучшили свои жилищные условия.

В современных рыночных условиях наиболее перспективным является вариант комплексного освоения земельных участков, предусматривающий не только строительство групп жилых домов, но и их обеспечение коммунальной и транспортной инфраструктурой.

Это относится, в том числе, и к малоэтажной застройке. В дальнейшем малоэтажное домостроение закономерно станет преобладающим при достигнутом уровне автоматизации. Наша задача в 2010 - 2011 гг. достигнуть показателей ввода таких домов на уровне 60 %, хотя еще десять лет назад индивидуальное строительство едва превышало 6 % от всего сдаваемого жилья. Поставленные целевые показатели по вводу жилья в Астраханской области на период 2011 - 2015 гг. (см. рисунок) не могут быть достигнуты без модернизации предприятий стройиндустрии.



Изменение показателей ввода жилья в Астраханской области по годам

Промышленность постоянно наращивает объемы производства, выпускаемые материалы, изделия, конструкции, способные конкурировать с импортной продукцией, обеспечивать снижение стоимости строительства и эксплуатационных затрат на содержание объектов и одновременно повышать комфортность проживания в жилых домах, необходимую надежность и долговечность.

В настоящее время строительная промышленность удовлетворяет потребности строительного комплекса области в полном объеме и не является, как в предыдущие годы, сдерживающим фактором наращивания объемов строительства

(см. таблицу), тем не менее в связи с планируемым ежегодным увеличением объема ввода жилья на территории Астраханской области наращиваются объемы производства за счет введения новых мощностей.

#### Объемы строительства

Наименование предприятия	Мощность предприятия на 01.11.2010	Увеличение мощности на 01.11.2010	Объем выпущенной продукции на 01.11.2010 (% к 2009)	% использования мощности
<b>Сборный железобетон, тыс. м<sup>3</sup></b>				
ЗАО ЗЖБК-2 ООО УСК «Стройкомплекс»	26	0	4,16 (43%)	19
ОАО ПСК «Строитель Астрахани»	67,4	0	7,65 (22%)	14
ОАО «Аксоль»	50	0	7,69 (65,2%)	18
ООО АДСК»	40	0	3,3 (79,7%)	10
ООО ПО «Железобетон»	92	0	30,82 (72,5%)	40
ООО «Евростройсервис – А»	30	0	12,13 (57%)	49
ООО «Аркес-Астрахань»	70	0	0,304 (8,71%)	1
ЖБК-7, ООО ПСК «Зодчии»	40	0	0,467	2
ООО СМФ «Строитель»	33	0	Стадия банкротства	
<b>ИТОГО</b>	<b>448,4</b>		<b>66,521</b>	<b>19</b>
<b>Панели с применением несъемной опалубки (технология VST) тыс. м<sup>2</sup></b>				
ОАО ПСК «Строитель Астрахани»	80	80	17,548	31
<b>Товарный бетон тыс. куб.м.</b>				
Основные производители	300	70	57,24 (125,8%)	23
<b>Стеновые материалы, млн. шт. усл. кирпича</b>				
ООО «Мострансстрой»	24	4	6,44 (76%)	32
ООО «Мабиком»	20	0	0	
ООО «Кирпичный завод «Инициатор»	20	10	6,4 (120,8%)	38

ООО УСК «Стройкомплекс»	8	25	0,82 (100,8%)	12
ООО ПО «Железобетон»	22,1	0	3,7 (26,7%)	20
«Кирпичный завод» ИП Шахабасов п. Зверева	2	0	0	
ООО «Керамика Поволжья»	7	0	0,03 (3%)	1
ООО «Кирпичный завод «Сизый бугор»	3,5	0,5	0,74 (72,5%)	25
ООО «Гончар»	3	0	0,87 (53%)	35
ООО СМФ «Строитель»	45	45	Стадия банкрот- ства	
ООО «Евростройсервис-А»	0,36	0,36	0	
ИТОГО	154,96	62,36		23
Гипсовый камень				
ОАО «Кнауф Гипс Баскунчак»	1170	0	427,4 (100,8%)	44
Керамзит, тыс. куб. м.				
ОАО ПСК «Строитель Астрахани»	58	0	28,7 (74,4%)	59
ООО «Кирикилинский керамзитовый завод»	27	0	15,92 (72,8%)	71
ИТОГО	85	0	44,62	65
Панели для строительства каркасно-щитовых домов, тыс. м <sup>2</sup>				
ООО УФ «Тинстрой»	20,0	20,0	7,5	45
УФ «Русская усадьба»	18,3	18,3	1,05	7
ИТОГО	38,3	38,3	8,55	26

Таким образом, на территории Астраханской области планируется: 1) запустить новый цех по производству керамического кирпича мощностью 10 млн. шт. усл. кирпича в год на кирпичном заводе ООО «Сизый бугор»; 2) запустить новый цех по производству керамического облицовочного кирпича мощностью 8,0 млн. шт. усл. кирпича в год на кирпичном заводе ООО «Инициатор»; 3) построить новый цех мощностью 3, 0 млн. шт. усл. кирпича в год на кирпичном заводе ООО «Рамс»; 4) построить новый цех мощностью 10 млн. шт. усл. кирпича в год на кирпичном заводе ООО «Тавакал-4»; 5) создать производстве по изготовлению панелей на основе металлического профиля и цементно-стружечных плин для строительства общественных зданий в ООО УФ «Тинстрой»; 6) строительство цеха в ОАО «ПСК «Строитель Астрахани» по производству конструкций с применением несъемной опалубки мощностью 120-160 тыс. м<sup>2</sup> общей площади строений в год; 7) строительство завода ООО «Интерхимгрупп» (г. Москва) по производству керамического кирпича в с. Черный Яр Черногоярского района мощностью 12 млн. штук усл. ед. в год; 8) строительство завода ЗАО «АЗКИ «Михайловская керамике» по производству керамическому кирпича в с. Чаган Камызякского района мощностью 60 млн. штук усл. ед. в год.

На уровне организационного обеспечения реализации поставленных задач необходимо решение вопросов вовлечения в оборот дополнительных участников, развития частно-государственного партнерства в их инфраструктурном обеспечении, дальнейшего снятия административных барьеров.

Все это позволит обеспечить улучшение жилищных условий и достигнуть увеличение годового объема ввода жилья до 1 м<sup>2</sup> на одного жителя, поднять показатель обеспеченности до 21,49 м<sup>2</sup> общей площади помещений уже в 2015 году, довести индекс доступности жилья с 4,5 в 2009 году до 3,2 в 2015 году.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полумордвинов О.А. Выбор рационального состава исполнителей сквозных бизнес-процессов строительной организации / О.А. Полумордвинов, И.Ю. Квятковская // Вестник АГТУ. Сер. Экономика. 2010. № 1. С. 198.

2. Модернизация регионов России и инвестиции в инновации : материалы 4-й Международ. науч.-практ. конф. Октябрь 2010 года / Астрахан. инж.-строит. ин-т. Астрахань, 2010.

3. Портал органов государственной власти Астраханской области. [www.astroble.ru](http://www.astroble.ru)

**Полумордвинов Олег Анатольевич –**

заместитель председателя Правительства Астраханской области,

министр строительства и дорожного хозяйства Астраханской области

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*

УДК 004.912

**Я.А. Седова, И.Ю. Квятковская**

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КОРПУСА ТЕКСТОВ НАУЧНОГО ЗНАНИЯ**

*Описаны семантическая модель корпуса документов и алгоритмы, позволяющие представить его в форме графа для последующего анализа. Разработан алгоритм поиска в корпусе документов с помощью созданной модели. Предлагается подход к обработке текстов авторефератов кандидатских и докторских диссертаций.*

Интеллектуальный анализ текстовых данных, семантическая модель, латентный семантический анализ, кластерный анализ, информационно-поисковая система

**Y.A. Sedova, I.Y. Kvyatkovskaya**

**SYSTEM ANALYSIS OF THE SCIENTIFIC DOCUMENTATION CORPUS**

*The semantic model of a document corpus and algorithms allowing to represent it as a graph for the following analysis are offered. The algorithm of the search within a document corpus is also described. The approach to process abstracts of PhD and doctoral theses is considered.*

Text mining, semantic model, latent semantic analysis, cluster analysis, information retrieval system

Современный этап развития науки характеризуется значительными темпами увеличения объема научного знания. Согласно статистике, опубликованной веб-ресурсом «Кадры высшей научной квалификации» [1], количество кандидатских диссертаций, утвержденных Высшей аттестационной комиссией, в последнее десятилетие значительно выросло. На сайте ВАК хранится электронный архив авторефератов докторских диссертационных работ за 2006 - 2010 гг., имеющий 9567 документов.

Научное знание, представленное документально, является слабо структурированным. Например, автореферат диссертационной работы имеет фиксированную структуру, но написан на естественном языке, что затрудняет его автоматическую семантическую обработку, т.к. формальной модели естественного языка в настоящее время не создано. Поэтому актуальна задача автоматизации анализа массива (корпуса) текстовых документов.

### Основные определения

Под *термином* в данной работе понимается слово или словосочетание на естественном языке, описывающее какое-либо понятие предметной области.

Назовем *словарем предметной области* совокупность терминов этой области, а *словарем документа* – совокупность терминов этого документа.

Если термин относится к определенной предметной области, то назовем его *доминантным* для этого документа.

В данной работе текстовый документ рассматривается в виде  $D = \langle T, W \rangle$ , где  $T = \{t_i \mid i = 1..m\}$  – множество доминантных терминов документа,  $W = \{w_i \mid i = 1..m\}$  – множество весов терминов, показывающих важность термина  $t_i$  для документа  $D$ . Эта модель основана на модели «набор слов» [2] (bag of words), но отличается от нее использованием терминов вместо одиночных слов.

Корпус текстовых документов может быть представлен в виде матрицы  $C$  «термин-на-документ» вида

$$C = \begin{pmatrix} & D_1 & D_2 & \dots & D_n \\ t_1 & w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ t_2 & w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_m & w_{m1} & w_{m2} & \dots & w_{mn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $t_1..t_m$  – доминантные термины всех документов корпуса,  $D_1..D_n$  – документы корпуса,  $w_{ij}$  – веса терминов в соответствующих документах.

Представление корпуса в виде матрицы позволяет рассматривать его как набор векторов в  $m$ -мерном пространстве, где  $m$  – количество терминов во всех документах корпуса. Модель основана на векторной модели пространства [3] (vector space model) и отличается от нее использованием терминов вместо одиночных слов.

Векторная модель пространства схематически изображена на рис. 1. Представление документов как векторов позволяет использовать аппарат векторной алгебры для анализа векторного пространства, в частности, для вычисления степени сходства между документами и для кластерного анализа корпуса документов.

Сходство между термином  $t_i$  и документом  $D_j$  может быть определено без дополнительных расчетов из матрицы  $C$  как элемент  $w_{ij}$ , стоящий на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца и показывающий вес термина  $t_i$  в документе  $D_j$ .

Для определения сходства между терминами или документами часто используется следующий факт. Рассмотрим матрицу  $CC^T$  размерностью  $m \times m$ . На пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца в этой матрице находится скалярное произведение векторов терминов  $t_i$  и  $t_j$   $\sum_{p=1}^n w_{ip} w_{pj}$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, m$ , которое может быть использовано в качестве мет-

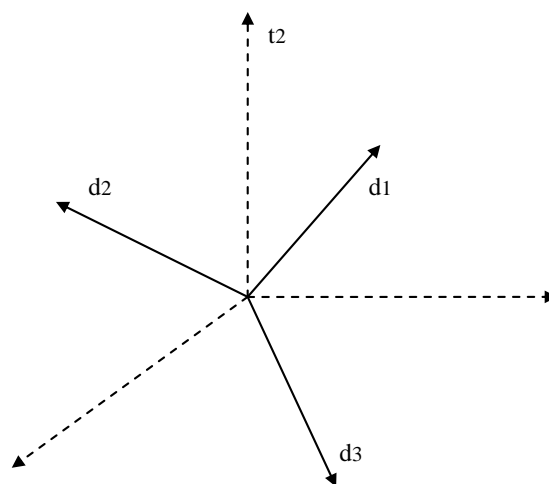


Рис. 1. Векторная модель пространства документов

рики сходства между этими векторами, т.е. и между терминами. Аналогично, матрица  $C^T C$  размерностью  $n \times n$  позволит вычислить сходство между документами. Могут быть использованы и другие метрики сходства: значение косинуса между векторами, Евклидово расстояние и др.

### Алгоритм извлечения доминантных терминов из текстового документа

Для получения списка доминантных терминов документа необходимо решить две задачи:

1. Получение списка всех терминов, употребляющихся в документе.
2. Выделение из этого списка терминов, которые являются доминантными для данного документа.

### Получение списка терминов из документа

Словосочетания, похожие на термины, извлекаются из текста с помощью метода *S-value* [4]. В работе [5] описан эксперимент, показывающий, что именно этот метод лучше всего позволяет выделить термины в текстах на русском языке.

Метод *S-value* работает следующим образом:

1. Осуществляется морфологический анализ текста. В англоязычной литературе данный этап описывается термином «частеречная разметка» (*part-of-speech, POS tagging*), который обычно подразумевает, что для каждого слова определяется часть речи, но не определяются морфологические характеристики. Для русского языка с его развитой системой словоизменений целесообразно производить полный морфологический анализ.

2. Из текста извлекаются словосочетания, удовлетворяющие следующим условиям:

1) словосочетание проходит через лингвистический фильтр, т.е. все входящие в него слова могут, исходя из их морфологических характеристик, быть частью термина. В работе П. Браславского и Е. Соколова [5] используются грамматические шаблоны, и отбираются только те словосочетания, которые удовлетворяют этим шаблонам. Удаляются также *stop-words*, не несущие самостоятельной смысловой нагрузки.

2) частота употребления словосочетания в тексте превышает заданное пороговое значение.

3) количество входящих в словосочетание слов (будем называть это значение *длиной словосочетания* и обозначать его, например,  $|a|$ ) не превышает заданное пользователем значение  $L$ .

Таким образом, из текста извлекаются так называемые *термины-кандидаты* и создается список биграмм, список триграмм и т.д.

1. Для каждого термина-кандидата вычисляется значение *S-value* по следующему алгоритму:

1) каждой подстроке  $b$  термина-кандидата  $a_0$  ставится в соответствие тройка чисел  $f(b)$ ,  $t(b)$ ,  $c(b)$ , где  $f(b)$  – частота употребления  $b$  в документе ( $frequency(b)$ ),  $t(b)$  – частота употребления  $b$  внутри других терминов-кандидатов,  $c(b)$  – количество этих более длинных терминов-кандидатов. Присваиваются значения  $c(b) = 1$ , а  $t(b) = frequency(a_0)$ .

2) для каждого термина-кандидата  $a$ , для которого выполняется условие  $|a| = L$ .

- вычислить  $C-value(a) = \log_2 |a| \cdot f(a)$ .

- для каждой подстроки  $b$  строки  $a$ :

$c(b) = c(b) + 1$ ;  $t(b) = t(b) + frequency(a)$ ;

3) присвоить  $l = L - 1$ .

4) для каждого термина-кандидата  $a$ , для которого  $|a| = l$

- если  $c(a) = 1$ , то  $C-value(a) = \log_2 |a| \cdot f(a)$ .

- иначе  $C-value(a) = \log_2 |a| (f(a) - \frac{1}{c(a)} t(a))$  и для каждой подстроки  $b$  строки  $a$ :

$$c(b) = c(b) + 1; t(b) = t(b) + frequency(a);$$

5) если  $l > 2$ , то переход к шагу (6), иначе останов.

В результате работы алгоритма для каждого термина-кандидата с длиной больше единицы будет вычислено значение меры C-value по формуле:

$$C - value(a) = \begin{cases} \log_2 |a| * frequency(a), & \text{если строка } a \text{ не вложена в другие строки,} \\ \log_2 |a| - \frac{1}{P(T_a)} * \sum_{b \in T_a} freq(b), & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $T_a$  – множество терминов-кандидатов, содержащих строку  $a$ ;  $P(T_a)$  – их количество.

### Выделение доминантных терминов

Мера C-value позволяет выявить термины в корпусе документов, однако в данной задаче необходимо выявить термины в рамках каждого из документов и определить, какие из выявленных словосочетаний являются доминантными для документа. С этой целью применяется мера TF\*IDF, позволяющая осуществить так называемый контрастный тест, присвоив словосочетаниям, которые часто встречаются не только в данном документе, но и в других документах корпуса, низкий вес, а словосочетаниям, которые в данном документе встречаются часто, а в других – редко, высокий вес.

Мера TF\*IDF для термина-кандидата  $t$  вычисляется по формуле

$$w(t) = \frac{frequency_C(t)}{|d|} \log \frac{N_D}{N_d}, \quad (3)$$

где  $freq_C(t) = \begin{cases} frequency(t), & \text{если } |t| = 1, \\ C - value(t) & \text{в противном случае;} \end{cases}$ ;  $|d|$  – количество слов в документе;  $N_D$  –

количество документов в анализируемом корпусе;  $N_d$  – количество документов в анализируемом корпусе, содержащих термин  $t$ .

### Латентный семантический анализ

В работе использован латентный семантический анализ (LSA – latent semantic analysis) как метод определения сходства значений слов и документов на основе статистических вычислений над большим текстовым корпусом [6]. Он использован, т.к. требуется дополнительной информации, такой как построенные вручную словари, семантические сети или базы знаний. В основе метода LSA содержится гипотеза о том, что между словами и тем контекстом, в котором они употребляются, существуют неявные (латентные) взаимосвязи. Предполагается, что семантическое значение документа может быть представлено как сумма значений входящих в него слов:

$$\text{значение(документ)} = \text{значение(слово}_1) + \text{значение(слово}_2) + \dots + \text{значение(слово}_m)$$

Метод позволяет вычислить корреляции между парой терминов, между парой документов и между термином и документом.

Каждая строка исходной матрицы  $C$  – вектор, соответствующий термину и показывающий его связь с каждым из документов корпуса:

$$t_i^T = \{w_{1i} \quad w_{2i} \quad \dots \quad w_{ni}\}, \quad (4)$$

Каждый столбец исходной матрицы  $C$  – вектор, соответствующий документу и показывающий его связь с каждым из терминов корпуса:

$$d_i = \{w_{i1} \quad w_{i2} \quad \dots \quad w_{im}\}^T, \quad (5)$$

Скалярное произведение  $t_i^T t_p$  двух векторов показывает корреляцию между соответствующими терминами. Произведение матриц  $CC^T$  содержит такие скалярные произведе-

ния. Элемент  $(i, p)$ , равный элементу  $(p, i)$ , содержит скалярное произведение  $t_i^T t_p = t_p^T t_i$ . Аналогично, матрица  $C^T C$  содержит скалярные произведения между векторами всех документов, показывающие корреляцию между ними:  $d_j^T d_q = d_q^T d_j$ .

Метод LSA заключается в сингулярном разложении матрицы  $C$  (SVD – singular value decomposition) и аппроксимации ее матрицей  $C_k$  меньшего ранга  $k$ . Тогда матрица  $C_k$ , содержащая только  $k$  первых линейно независимых компонент  $C$ , отражает структуру ассоциативных связей, присутствующих в исходной матрице, и не содержит «шума». Помимо этого, уменьшение размерности матрицы ведет к уменьшению количества вычислений.

По теореме о сингулярном разложении существует разложение матрицы  $C = UZV^T$ , такое что  $U$  и  $V$  – прямоугольные матрицы, а  $Z$  – диагональная матрица.

Тогда, как отмечалось выше, сходство между терминами и (или) документами может быть определено из следующих соотношений:

1. Сходство между термином и документом может быть определено из произведения матриц:

$$C = UZV^T = (U\sqrt{Z})(\sqrt{Z}V^T), \quad (6)$$

2. Сходство между двумя терминами может быть получено из следующего выражения:

$$CC^T = (UZV^T)(UZV^T)^T = (UZV^T)(V^T Z^T U^T) = UZV^T V Z^T U^T = UZZ^T U^T = (UZ)(UZ)^T, \quad (7)$$

3. Сходство между двумя документами может быть получено из следующего выражения:

$$C^T C = (UZV^T)^T (UZV^T) = (V^T Z^T U^T)(UZV^T) = V Z^T U^T U Z V^T = V Z^T Z V^T = (VZ)(VZ)^T, \quad (8)$$

Произведения матриц  $ZZ^T$  и  $Z^T Z$  являются диагональными матрицами, поэтому матрица  $U$  должна содержать собственные вектора  $CC^T$ , а матрица  $V$  – собственные вектора  $C^T C$ . Оба произведения должны иметь одинаковые не равные нулю собственные значения при не равных нулю элементах  $ZZ^T$  или, что то же самое, при не равных нулю элементах  $Z^T Z$ .

Разложение матрицы  $C$  выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & \dots & w_{mn} \end{bmatrix}^C = \begin{bmatrix} \left[ \begin{matrix} u_1 \\ \vdots \\ u_l \end{matrix} \right] \dots \left[ \begin{matrix} u_1 \\ \vdots \\ u_l \end{matrix} \right] \end{bmatrix}^U \cdot \begin{bmatrix} z_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & z_l \end{bmatrix}^Z \cdot \begin{bmatrix} \left[ \begin{matrix} v_1 \\ \vdots \\ v_l \end{matrix} \right] \end{bmatrix}^{V^T}, \quad (9)$$

где  $z_1, \dots, z_l$  – сингулярные числа,  $u_1, \dots, u_l$  и  $v_1, \dots, v_l$  – левый и правый сингулярные вектора.

Известно, что выбор  $k$  наибольших сингулярных значений и соответствующих им сингулярных векторов из матриц  $U$  и  $V$  даст наилучшую аппроксимацию матрицы  $C$  матрицей ранга  $k$ :

$$C_k = U_k Z_k V_k^T. \quad (10)$$

Теперь, применяя к уменьшенным матрицам полученные ранее соотношения (6), (7) и (8), можно вычислить сходство каждой пары терминов как скалярное произведение соответствующих векторов, умноженных на сингулярные значения:

$$C_k C_k^T = (U_k Z_k)(U_k Z_k)^T. \quad (11)$$

Аналогично определяется сходство каждой пары документов:

$$C_k^T C_k = (V_k Z_k)(V_k Z_k)^T. \quad (12)$$

Сходство между парой термин – документ определяется по формуле

$$C_k = (U_k \sqrt{Z_k})(\sqrt{Z_k} V_k^T). \quad (13)$$



### Семантическая модель и граф корпуса документов научного знания

Численные значения сходства между терминами, между документами и между терминами и документами корпуса позволяют построить следующую семантическую модель корпуса документов  $A$ :

$$A = \langle D, T, S^D, S^t, S^{tD} \rangle, \quad (14)$$

где  $D = \{D_i \mid i = 1 \dots n\}$  – множество документов корпуса;  $T = \{t_i \mid i = 1 \dots m\}$  – множество терминов корпуса;  $S^D = (s_{ij}^D) \ (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n)$  – матрица, в которой элемент  $s_{ij}^D$  отражает меру сходства между документами  $D_i$  и  $D_j$ ;  $S^t = (s_{ij}^t) \ (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, m)$  – матрица, в которой элемент  $s_{ij}^t$  отражает меру сходства между терминами  $t_i$  и  $t_j$ ;  $S^{tD} = (s_{ij}^{tD}) \ (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n)$  – матрица, в которой элемент  $s_{ij}^{tD}$  отражает меру сходства между термином  $t_i$  и документом  $D_j$ .

Таким образом, корпус может быть представлен в виде взвешенного графа  $G = \langle X, R \rangle$ , где  $X = \langle D, T \rangle$  – множество вершин графа, состоящее из множества документов корпуса и множества входящих в них терминов,  $R = \langle R^D, R^t, R^{tD} \rangle$  – множество ребер, соединяющих документы и термины между собой и друг с другом, и определена функция  $w: R \rightarrow \mathfrak{R}$ , на множестве ребер принимающая значения в действительных числах (рис. 2).

Ребро  $(D_i, D_j) \in R^D$  между вершинами  $D_i \in D$  и  $D_j \in D$  существует, если  $s_{ij}^D > \varepsilon^D$ , где  $\varepsilon^D > 0$  – заданный порог. Вес этого ребра – значение  $s_{ij}^D$ . Аналогично, ребро  $(t_i, t_j) \in R^t$  между вершинами  $t_i \in T$  и  $t_j \in T$  существует, если  $s_{ij}^t > \varepsilon^t$ , а ребро  $(t_i, D_j) \in R^{tD}$  между вершинами  $t_i \in T$  и  $D_j \in D$  существует, если  $s_{ij}^{tD} > \varepsilon^{tD}$ , где  $\varepsilon^t > 0$  и  $\varepsilon^{tD} > 0$  – заданные пороги. Весами этих ребер являются соответственно значения  $s_{ij}^t$  и  $s_{ij}^{tD}$ .

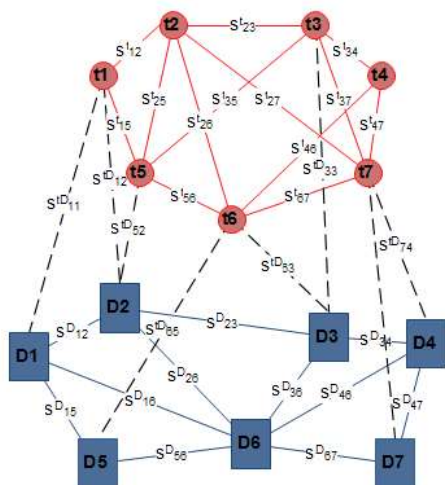


Рис. 2. Граф корпуса документов

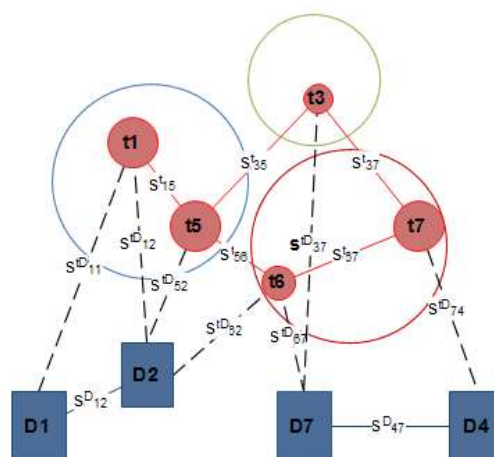


Рис. 3. Результаты поиска по корпусу

### Метрические характеристики корпуса и его элементов

Представление корпуса документов в виде графа  $G = \langle X, R \rangle$  позволяет применить для его анализа графовые алгоритмы и математический аппарат теории графов. В частности, метрические характеристики графа в применении к корпусу документов могут быть интер-

претированы следующим образом. Пусть  $d(t_i, t_j)$  – расстояние между вершинами  $t_i$  и  $t_j$ . Тогда можно выделить следующие *характеристики термина*  $t_i$ , показывающие уровень его детализации в данном корпусе: 1) эксцентриситет вершины  $t_i$   $ecc(t_i) = \max_{j=1..m} d(t_i, t_j)$ ; 2) степень вершины  $t_i$   $deg(t_i) = |\{t_j \in T : (t_i, t_j) \in R^t\}|$ .

Аналогично можно выделить следующие *характеристики документа*  $D_i$ , показывающие уровень его детализации в данном корпусе: 1) эксцентриситет вершины  $D_i$   $ecc(D_i) = \max_{j=1..m} d(D_i, D_j)$ ; 2) степень вершины  $D_i$   $deg(D_i) = |\{D_j \in D : (D_i, D_j) \in R^D\}|$ .

Также можно выделить *характеристики корпуса*, показывающие уровень его детализации: 1) радиус словаря корпуса  $rad_T(G) = \min_{i=1..m} (ecc(t_i))$ ; 2) радиус корпуса  $rad(G) = \min_{i=1..n} (ecc(D_i))$ ; 3) диаметр словаря корпуса  $diam_T(G) = \max_{i=1..m} (ecc(t_i))$ ; 4) диаметр корпуса  $diam(G) = \max_{i=1..n} (ecc(D_i))$ .

Введенные метрические характеристики корпуса, документа и термина позволяют оценить качество корпуса документов.

### Поиск по корпусу

Как правило, результаты латентного семантического анализа используются для поиска по корпусу документов. Этот метод поиска называется латентным семантическим индексированием (*LSI – latent semantic indexing*). Запрос представляется как псевдодокумент (еще один вектор документа)  $q = Z_k^{-1} U_k^T q$ , и после этого его сходство с каким-либо документом корпуса может быть вычислено как сходство между вектором запроса и вектором этого документа.

Однако описанная выше модель предоставляет возможность задавать более подробные запросы, перейдя от естественного языка к ограниченному естественному языку. Определим поисковый запрос  $q$  в виде следующего логического выражения:

$$q = \wedge(\vee(\theta_i)), \theta_i \in \{t_i^q, -t_i^q\}. \quad (15)$$

Примером такого запроса может быть следующее выражение:

$q = \text{информационный поиск} \wedge (\text{кластерный анализ} \vee \text{латентный семантический анализ}) \wedge \neg \text{латентное семантическое индексирование}$

Дополнительными параметрами запроса могут быть *документные операторы*, которые позволяют сделать поиск более конкретным: 1) поиск по заголовкам документов; 2) поиск по заданному сайту; 3) поиск файлов заданного типа; 4) поиск файлов на заданном языке; 5) поиск файлов в заданном временном интервале.

Тогда постановка задачи информационного поиска в корпусе выглядит следующим образом:

Задан запрос  $q$ . Необходимо для этого запроса найти подграф  $G^q = \langle X^q, R^q \rangle$  графа  $G$ , где  $X^q = \langle D^q, T^q \rangle$  – множество вершин, а  $R^q$  – множество ребер, соединяющих документы и термины между собой и друг с другом, причем  $T^q = \{t_i^q \mid T^q \subset T, \theta_i \neq -t_i^q\}$  и  $D^q = \{D_j \mid \exists t_i^q : (t_i^q, D_j) \in R^{TD}\}$ .

Релевантность документа  $D_i \in D^q$  запросу  $q$  может быть определена по формуле

$$r_i(D_i, q) = \sum_{t_i^q \in T^q} s_{ij}^{TD}. \quad (16)$$

Однако эта формула не учитывает связи между документами. Предположим, что пользователя интересует в первую очередь семантически связанное подмножество документов, входящее в  $D^q$ . Тогда формулу (16) можно изменить, добавив второе слагаемое:

$$r_i(D_i, q) = \sum_{t_j^q} s_{ij}^{TD} + \sum_{D_j \in D'} s_{ij}^D. \quad (17)$$

Результаты поиска могут быть представлены в виде

$$A' = \langle D', T', S'^D, S'', S'^{TD} \rangle, \quad (18)$$

где переменные аналогичны переменным из формулы (14), кроме  $D' = D^q = \{D_j \mid \exists t_i^q : (t_i^q, D_j) \in R^{TD}\} (i = 1, \dots, m'; j = 1, \dots, n')$  и  $T' = \{t_i \mid \exists D_j \in D' : t_i \in D_j\} (i = 1, \dots, m'; j = 1, \dots, n')$ , т.е. множество терминов составлено путем добавлением ко множеству терминов запроса тех терминов, которые входят в документы, найденные по запросу.

На рис. 3 изображен пример результатов поиска. Большими закрашенными кругами обозначены термины, которые входили в запрос, а малыми – термины, которые в запрос не входили, но входили в документы, найденные по запросу.

Для улучшения восприятия результатов поиска может быть осуществлена кластеризация элементов (рис. 3), т.е. выполняется функция  $\alpha : T' \rightarrow K$ , которая каждому объекту  $t_i \in T'$  ставит в соответствие номер кластера  $k_j \in K$ , где  $K$  – множество номеров кластеров. Таким образом, каждому кластеру  $k_j$  ставится в соответствие подмножество терминов  $T^j \in T'$ .

Кластерный анализ позволяет пользователю продолжить поиск, сузив его область до содержимого выбранных кластеров  $K' \subset K$ . Тогда корпус вновь может быть представлен в виде модели  $A$ , причем множество терминов задается по формуле  $T = \{T^j \mid k_j \in K'\}$ .

### Выводы

Описана методика анализа научного знания, представленного документально. Рассмотрение корпуса документов в виде графа позволяет применить для его анализа графовые алгоритмы и математический аппарат теории графов. Введенные метрические характеристики корпуса, документа и термина позволяют оценить качество корпуса документов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Деятельность сети диссертационных советов Российской Федерации [Электронный ресурс]. Информационный интернет-ресурс «Кадры высшей научной квалификации», 2010. Режим доступа: [http://science-expert.ru/dsrf/federal\\_level/Stat\\_dis\\_1.shtml](http://science-expert.ru/dsrf/federal_level/Stat_dis_1.shtml), свободный. – Загл. с экрана.
2. Ландэ, Д. В. Поиск знаний в Internet. Профессиональная работа / Д. В. Ландэ. М: Изд. дом «Вильямс», 2005. 272 с.
3. Salton, G. A vector space model for automatic indexing / G. Salton, A. Wong, C. S. Yang // Communications of the ACM. 1975. Vol. 18, №11. P. 613-620.
4. Frantzi, K. Automatic recognition of multi-word terms: the C-value / NC-value method / K. Frantzi, S. Ananiadou, H. Mima // International journal on digital libraries. 2000. №3. P. 115-130.
5. Браславский, П. Сравнение пяти методов извлечения терминов произвольной длины / П. Браславский, Е. Соколов // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной Международной конференции «Диалог» (Бекасово, 4–8 июня 2008 г.). 2008. Вып. 7 (14). С. 67-74.
6. Landauer T. K. An introduction to latent semantic analysis / T. K. Landauer, P. Foltz, D. Laham // Discourse Processes. 1998. №25. P. 259–284.
7. Handbook of latent semantic analysis / Landauer T. K. [et al.]. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 2007. 544 p.

**Седова Яна Анатольевна –**

старший преподаватель кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Астраханского государственного технического университета

**Квятковская Ирина Юрьевна –**

доктор технических наук, профессор, директор Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 04.10.10, принята к опубликованию 19.10.10*



