

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»



ISSN 1684-8519

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 321, № 5, 2012

Управление,
вычислительная техника
и информатика

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ
г. Томск

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Редакционный совет:

Чубик П.С. (председатель), д.т.н., ректор ТПУ (г. Томск)
Пестряков А.Н. (заместитель председателя),
д.х.н., проректор ТПУ по НИИ (г. Томск)
Алексеенко С.В., д.ф.-м.н.,
член-корреспондент РАН (г. Новосибирск)
Болдырев В.В., д.х.н., академик РАН (г. Новосибирск)
Боровиков Ю.С., к.т.н. (г. Томск)
Гуляев Ю.В., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Москва)
Дамамм Ж., PhD, д.н. (Франция)
Дмитриев А.Ю., к.т.н. (г. Томск)
Долматов О.Ю., к.т.н. (г. Томск)
Ершов Ю.Л., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Новосибирск)
Замятин А.В., к.т.н. (г. Томск)
Клименов В.А., д.т.н. (г. Томск)
Конторович А.Э., д.г.-м.н., академик РАН (г. Новосибирск)
Крёнинг М., PhD, д.н. (Германия)
Летников Ф.А., д.г.-м.н., академик РАН (г. Иркутск)
Месяц Г.А., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Москва)
Михайленко Б.Г., д.ф.-м.н.,
академик РАН (г. Новосибирск)
Накоряков В.Е., д.т.н., академик РАН (г. Новосибирск)
Панин В.Е., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Томск)
Сигов А.С., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Москва)
Сигфуссон Т.И., PhD, д.н. (Исландия)
Третьяков Ю.Д., д.х.н., а. РАН (г. Москва)
Турнаев В.И., д.и.н. (г. Томск)
Филлипов Г.А., д.т.н., академик РАН (г. Москва)
Чайковский Д.В., к.ф.н. (г. Томск)
Шень Джаоли, PhD, д.н. (Китай)
Яковлев А.Н., к.ф.-м.н. (г. Томск)

Редакционная коллегия:

Пестряков А.Н. (председатель, главный редактор), д.х.н.
Коробейников А.Ф. (зам. председателя), д.г.-м.н.
Глазырин А.С. (главный редактор Издательства ТПУ), к.т.н.
Могильницкий С.Б. (учёный секретарь), к.ф.-м.н.
Барышева Г.А., д.э.н.
Григорьев В.П., д.ф.-м.н.
Заворин А.С., д.т.н.
Иванчина Э.Д., д.т.н.
Ильин А.П., д.ф.-м.н.
Корниенко А.А., д.ф.н.
Лавринович В.А., д.т.н.
Погребной В.К., д.т.н.
Савичев О.Г., д.г.н.
Тузовский А.Ф., д.т.н.
Шаманин И.В., д.ф.-м.н.

Журнал зарегистрирован Министерством
Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № 77-16615 от 24 октября 2003 г.
Учредитель: Томский политехнический университет

Издается с 1903 г.

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Editorial Board:

Chubik P.S. (Chairman), D.E., rector of TPU (Tomsk)
Pestryakov A.N. (Deputy Chairman) D. Chem.,
pro-rector of TPU for Research and Innovation (Tomsk)
Aleksenko S.V., Phys. and Math. D. Sc.,
corresponding member of RAS (Novosibirsk)
Boldyrev V.V., D. Chem., member of RAS (Novosibirsk)
Borovikov Yu.S., Candidate of Science (Tomsk)
Gulyaev Yu.V., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Moscow)
Damamme G., Phys. and Math, D. Sc. (France)
Dmitriev A.Yu., Candidate of Science (Tomsk)
Dilmatov O.Yu., Candidate of Science (Tomsk)
Ershov Yu.L., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Novosibirsk)
Zamyatin A.V., Candidate of Science (Tomsk)
Klimenov V.A., D.E. (Tomsk)
Kontorovich A.E., Geol. and Mineral. D. Sc., member of RAS (Novosibirsk)
Kröning M., Dr.h.c. (Germany)
Letnikov F.A., Geol. and Mineral. D. Sc., member of RAS (Irkutsk)
Mesyats G.A., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Moscow)
Mikhailenko B.G., Phys. and Math. D. Sc.,
member of RAS (Novosibirsk)
Nakoryakov V.E., D. E., member of RAS (Novosibirsk)
Panin V.E., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Tomsk)
Sigov A.S., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Moscow)
Sigfusson T.I., Ph. D. (Iceland)
Tretyakov Yu.D., D. Chem., member of RAS (Moscow)
Turnaev V.I., Ph. D. (Tomsk)
Filippov G.A., D.E., member of RAS (Moscow)
Chaikovskij D.N., Candidate of Science (Tomsk)
Shen Zhaoli, Ph. D. (China)
Yakovlev A.N., Candidate of Science (Tomsk)

Editorial:

Pestryakov A.N. (Chairman, editor in Chief), D. Chem.
Korobeinikov A.F. (Deputy Editor in Chief), Geol. and Mineral. D. Sc.
Glazyrin A.S. (Editor in Chief), Candidate of Science
Mogilnitsky S.B. (Science Secretary), Candidate of Phys. and Math. Sc.
Barysheva G.A., Ec. D.
Grigoriev V.P., Phys. and Math. D. Sc.
Zavorin A.S., D.E.
Ivanchina E.D., D.E.
Ilyin A.P., Phys. and Math. D. Sc.
Kornienko A.A., Ph. D.
Lisitzyn V.M., Phys. and Math. D. Sc.
Pogrebnoy V.K., D.E.
Savichev O.G., Geol. D. Sc.
Tuzovsky A.F., D.E.
Shamanin I.V., Phys. and Math. D. Sc.

Подписной индекс по каталогу
Агентства «Роспечать» – 18054

Журнал рассылается в адреса 50-и библиотек РФ,
США, ФРГ, Великобритании, Франции
и 9-и стран ближнего зарубежья

Полнотекстовый доступ к электронной версии
журнала возможен на сайтах ТПУ: portal.tpu.ru/izvestiya/;
ООО «Научная электронная библиотека»:
www.elibrary.ru, www.e-library.ru,
а также поисковой системы scholar.google.com

Импакт-фактор РИНЦ 2011 г. 0,210

© Tomsk Polytechnic University, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

- Оптимальная непрерывно-дискретная передача сигнала по каналам с памятью при наличии бесшумной обратной связи
Рожкова С.В.
- Оптимальная непрерывно-дискретная передача сигнала по каналам с запаздыванием
Рожкова С.В.
- Компьютерная модель сопряжения элементов в строго-иерархической стратифицированной системе
Баласанян С.Ш.
- Многомодальность высокоинтенсивного полумарковского потока в условиях предельно редких изменений его состояний
Назаров А.А., Ямпольский В.З., Яценко М.А.
- Метод моментов для исследования математической модели параллельного обслуживания кратных заявок потока марковского восстановления
Синякова И.А., Моисеева С.П.
- Синтез линейных робастных регуляторов интервальных систем с использованием программного обеспечения MDSLS
Гайворонский С.А., Езангина Т.А.
- Разработка модуля оптимизации и исследование процессов промышленной подготовки газового конденсата с применением моделирующей системы
Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Кузьменко Е.А., Хлебникова Е.С.
- Анализ алгоритма расчета формы плазменного шнура токамака КТМ с точки зрения параллельных вычислений
Ли А.М., Саньков А.А., Павлов В.М., Абанкин А.С.
- Применение методологии OMSD для моделирования системы планирования геолого-технических мероприятий
Силич В.А., Ямпольский В.З., Савельев А.О., Комагоров В.П., Алексеев А.А., Гребенщиков С.А.
- Технология разработки системы поддержки принятия решений для управления проектными работами при обустройстве месторождений нефти и газа
Гребенщиков С.А., Силич В.А., Комагоров В.П., Фофанов О.Б., Савельев А.О.
- Решение задачи определения изоморфизма графов, представленных атрибутными матрицами
Погребной В.К.
- Применение нейронной сети и дискретного вейвлет-преобразования для анализа и классификации электрокардиограмм
Григорьев Д.С., Спицын В.Г.
- Задача разбиения множества объектов территориально распределенной системы на подмножества неравной мощности
Погребной Ал.В., Погребной В.К.
- Информационная технология для решения задач интеллектуального анализа производственных данных
Кудинов А.В.
- Адаптивная интерпретация нестационарных гидродинамических исследований в системе «Пласск-скважина» методом интегрированных моделей
Гаврилов К.С., Сергеев В.Л.
- Применение алгоритмов учета облачности в задаче атмосферной коррекции спутниковых данных ETM+/LANDSAT
Соломатов Д.В., Афонин С.В., Белов В.В.
- Применение технологии UNITESK для функционального тестирования системы управления сетью широкополосного беспроводного доступа стандарта IEEE 802.16
Бойченко И.В., Бортников Е.В., Немеров А.А.
- Эксперимент по фрактальному сжатию RGB-изображений на вычислительном кластере
Бойченко И.В., Кулбаев С.С., Немеров А.А., Голенков В.В.
- Система семантической оптимизации содержимого веб-сайтов на основе пользовательских предпочтений
Баночкин П.И., Вичугов В.Н.

CONTENTS

CONTROL, COMPUTER SCIENCE AND TECHNOLOGY

- 6 Optimal discrete-continuous signal memory channel transmission at quiet feedback
Rozhkova S.V.
- 10 Optimal discrete-continuous signal delay channel transmission
Rozhkova S.V.
- 14 Computer model of elements link in strictly hierarchical stratified system
Balasanyan S.Sh.
- 19 Multimodality of high-intensity semi-Markov stream at extremely rare changes of its state
Nazarov A.A., Yampolsky V.Z., Yatsenko M.A.
- 24 The moment method for studying the mathematical model of parallel service of multiple demands in the stream of Markov restoration
Sinyakova I.A., Moiseeva S.P.
- 29 Synthesis of linear robust controllers in the interval systems using MDSLS
Gayvoronsky S.A., Ezangina T.A.
- 35 The development of optimization module and study of gas condensate field treatment applying modeling system
Usheva N.V., Moyzes O.E., Kuzmenko E.A., Khlebnikova E.S.
- 38 The analysis of algorithm for computing the plasma column shape in KTM tokamak from the point of view of parallel computing
Li A.M., Sankov A.A., Pavlov V.M., Abankin A.S.
- 42 Application of OMSD methodology for modeling the system for planning well interventions
Silich V.A., Yampolsky V.Z., Savelyev A.O., Komagorov V.P., Alekseev A.A., Grebenshchikov S.A.
- 47 The technique for developing the decision support system for controlling the design works at oil and gas fields construction
Grebenshchikov S.A., Silich V.A., Komagorov V.P., Fofanov O.B., Savelyev A.O.
- 52 Solving the problem of determining graph isomorphism represented by the attributive matrices
Pogrebnoy V.K.
- 57 Application of neural network and discrete wavelet transform for analyzing and classifying electrocardiograms
Grigoryev D.S., Spitsyn V.G.
- 61 The task of decomposition of object set in geographically distributed system into subsets of unequal power
Pogrebnoy Al.V., Pogrebnoy V.K.
- 66 Information technology for solving the problems of data mining of production data
Kudinov A.V.
- 72 Adaptive interpretation of nonstationary state hydrodynamic researches in the system «pool-well» by the integrated model technique
Gavrilov K.S., Sergeev V.L.
- 76 Application of algorithms for recording cloudiness in the problem of atmospheric correction of satellite data ETM+/LANDSAT
Solomatov D.V., Afonin S.V., Belov V.V.
- 81 Application of UniTESK technique for functional testing the management system of broadband wireless access network of IEEE 802.16 standard
Boychenko I.V., Bortnikov E.V., Nemerov A.A.
- 87 The experiment in fractal compression of RGB-images at computer cluster
Boychenko I.V., Kulbaev S.S., Nemerov A.A., Golenkov V.V.
- 93 The system of semantic optimization of web-site content on the basis of user inclinations
Banokin P.I., Vichugov V.N.

- Оптимизация алгоритмов нечеткого поиска в системах мониторинга лесопожарной обстановки
Сонькин М.А., Лещик Ю.В.
- Идентификация параметров асинхронных электродвигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе разностных схем
Глазырин А.С., Боловин Е.В.
- Принцип построения отказоустойчивой системы управления асинхронным электроприводом
Ткачук Р.Ю., Глазырин А.С.
- Синтез фильтра минимального порядка для системы диагностики синхронного генератора
Утанан С.А., Полищук В.И.
- Определение наличия гармонических составляющих и их частот в дискретных сигналах на основе автокорреляционной функции
Аврамчук В.С.
- Использование энергетических и информационных показателей в оценке состояния функционирования медицинских систем
Гергет О.М., Коچهгуров В.А.
- Интегральные методы оценки состояния сложных систем
Фокин В.А., Пеккер Я.С., Берестнева О.Г., Гергет О.М.
- Метод автоматического построения тезаурусов на основе статистической обработки текстов на естественном языке
Бессмертный И.А., Нугуманова А.Б.
- Генерация интеллектуальных агентов для задач поддержки технического обслуживания и ремонта
Кизим А.В., Кравец А.Д., Кравец А.Г.
- Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики
Массель Л.В., Массель А.Г.
- Биоинспирированные алгоритмы выделения информативных признаков изображений
Кучуганов А.В.
- Алгоритм восстановления площадей прироста, основанный на геометрических особенностях годовых колец деревьев
Волков Ю.В., Тартаковский В.А.
- Применение квадратичного программирования при синтезе регуляторов вещественным интерполяционным методом
Воронин А.В., Щелканова Т.А.
- Распознавание печатных текстов на основе применения вейвлет-преобразования и метода главных компонент
Фан Нгок Хоанг, Буй Тхи Тху Чанг, Спицын В.Г.
- Контроль логических выводов в семантических базах данных
Хоанг Ван Куэт, Тузовский А.Ф.
- Нечеткая диаграмма поведения узла нагрузки главного привода цементной печи
Бажанов А.Г., Мегергут В.З.
- Индуктивный метод самоорганизации математических моделей в приложении к задачам прикладной метеорологии
Синёва К.Я., Кичильдинов В.С., Калайда В.Т., Белов В.М.
- Автоматизированный мониторинг ключевых показателей деятельности проектной организации
Громаков Е.И., Александрова Т.В., Лиепинш А.В., Малышенко А.М.
- Эффективное использование графических ускорителей при параллельной оптимизации финансовых стратегий на кластерной системе
Монахов О.Г.
- Построение итерационного метода для задачи производственного планирования в условиях неопределенности цен
Медведко О.В.
- Метод принятия решений на основе анализа ситуаций и семантических технологий
Разин В.В., Тузовский А.Ф.
- К статистике морфологии случайных пространственно-временных сигналов, сформированных двумерным точечным потоком восстановления
Дубинин Д.В., Коچهгуров А.И., Лаевский В.Е. (Герингер В.)
- Повышение точности оценки координат абонента системы мобильной связи посредством контроля за уровнем замираний сигнала в канале распространения
Великанова Е.П., Ворошилин Е.П., Рогожников Е.В.
- 98 Application of fuzzy search algorithms in the systems for monitoring fire situation in the forests
Sonkin M.A., Leshchik Yu.V.
- 101 Identification of parameters of induction motors with stationary squirrel-cage rotor based on difference schemes
Glazyrin A.S., Bolovin E.V.
- 105 The principle of designing the fault-tolerant system for controlling the induction motor drive
Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S.
- 110 Synthesis of minimum degree filter for synchronous generator diagnostics
Utanan S.A., Polishchuk V.I.
- 113 Determining the presence of harmonic components and their frequencies in discrete signals based on autocorrelation function
Avramchuk V.S.
- 117 The use of energy and information indicators when estimating the state of medical system functioning
Gerget O.M., Kochegurov V.A.
- 120 The integral methods for estimating the complex system state
Fokin V.A., Pekker Ya.S., Berestneva O.G., Gerget O.M.
- 125 The method of thesaurus automatic construction on the basis of natural language statistical processing
Bessmertny I.A., Nugumanova A.B.
- 131 Generation of intelligent agents for the tasks of supporting the maintenance and repair
Kizim A.V., Kravets A.D., Kravets A.G.
- 135 Intelligent computing in studying the directions of power engineering development
Massel L.V., Massel A.G.
- 141 Bioinspired algorithms for selecting image informative criteria
Kuchuganov A.V.
- 146 Algorithm of increment area restoration based on geometric singularities of tree-rings
Volkov Yu.V., Tartakovsky V.A.
- 150 Application of quadratic programming when synthesizing regulators by the real interpolation method
Voronin A.V., Shchelkanova T.A.
- 154 Text recognition based on application of wavelet transform and principal component analysis
Phan Ngoc Hoang, Bui Thi Thu Trang, Spitsyn V.G.
- 158 Inference control in semantic databases
Hoang Van Kuet, Tuzovsky A.F.,
- 163 Fuzzy chart of load node behavior in the main gear of wet rotary cement kiln
Bazhanov A.G., Megergut V.Z.
- 167 The inductive approach to mathematical model self-organization in application to the applied meteorology problems
Sinyeva K.Ya., Kichkildinov V.S., Kalayda V.T., Belov V.M.
- 173 The automatized monitoring of key indicators for the design organization activity
Gromakov E.I., Aleksandrova T.V., Liepinsh A.V., Malyschenko A.M.
- 179 The efficient use of graphic accelerators at parallel optimization of financial strategies on cluster system
Monakhov O.G.
- 183 The construction of iteration method for production planning task at price uncertainty
Medvedko O.V.
- 188 The decision making method based on analysis of situations and semantic technologies
Razin V.V., Tuzovsky A.F.
- 194 On the morphology statistics of space-time random signals formed by two-dimensional Markov renewal process
Dubinin D.V., Kochegurov A.I., Laevsky V.E. (Geringer V.)
- 199 Increasing the accuracy when estimating the coordinates of mobile system subscriber controlling the level of signal depression in distribution channel
Velikanova E.P., Voroshilin E.P., Rogozhnikov E.V.

Сегментация изображений с помощью рекуррентной нейронной сети Немировский В.Б., Стоянов А.К.	205	Image segmentation by recurrent neural network Nemirovsky V.B., Stoyanov A.K.
Диагностика моделей баз данных на основе производственной системы Мицель А.А., Сибилев В.Д., Красиков И.А.	210	Diagnostics of database models the basis of production system Mitsel A.A., Sibilev V.D., Krasikov I.A.
Адаптивный алгоритм обработки потока навигационных данных на основе метода диагностической фильтрации Хруль С.А., Сонькин Д.М.	217	The adaptive algorithm for processing the navigation information stream based on diagnostic filtering technique Khrul S.A., Sonkin D.M.
Моделирование передачи данных в беспроводных сенсорных сетях Тараканов Е.В.	223	Data transmission modeling in wireless sensor networks Tarakanov E.V.
Разработка системы автоматического управления резистивным нагревом кремниевых стержней переменным током Горюнов А.Г., Курочкин В.А., Чучалин И.П., Москалев В.А.	228	The development of automated system for controlling silicon rods resistive heating by alternating current Goryunov A.G., Kurochkin V.A., Chuchalin I.P., Moskaev V.A.
Алгоритм моделирования систем автоматического управления методом пространства состояний Михалевич С.С., Байдали С.А., Чучалин И.П., Москалев В.А.	233	The algorithm for modeling the control system of the state space method Mikhalevich S.S., Baydali S.A., Chuchalin I.P., Moskaev V.A.
СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ ТПУ		PAGES OF HISTORY OF TPU
Кафедре прикладной математики 40 лет Кочегуров В.А., Берестнева О.Г., Шевелев Г.Е.	238	The department of applied mathematics is 40 Kochegurov V.A., Berestneva O.G., Shevelev G.E.
НАШИ ЮБИЛЯРЫ		ANNIVERSARIES
Профессору А.Ф. Тузовскому – 60 лет	243	Professor A.F. Tuzovsky is 60
Профессору А.М. Малышенко – 75 лет	245	Professor A.M. Malyshenko is 75
Профессору В. И. Гончарову – 75 лет	248	Professor V.I. Goncharov is 75
РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ		SUMMARIES
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	255	INFORMATION ABOUT AUTHORS

Управление, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА и информатика

УДК 519.2

ОПТИМАЛЬНАЯ НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНАЯ ПЕРЕДАЧА СИГНАЛА ПО КАНАЛАМ С ПАМЯТЬЮ ПРИ НАЛИЧИИ БЕСШУМНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

С.В. Рожкова

Томский политехнический университет

E-mail: rozhkova@tpu.ru

Рассматривается задача оптимальной передачи стохастических процессов по непрерывно-дискретным каналам с памятью при наличии бесшумной обратной связи в наблюдениях. Доказываются экстремальные свойства оптимальных кодирований в смысле максимизации количества информации.

Ключевые слова:

Сигнал, стохастические системы, канал передачи, кодирование, декодирование.

Key words:

Signal, stochastic system, transmission channel, coding, decoding.

1. Постановка задачи

Сигнал x_t , сообщение на выходе канала передачи z_t и сообщение на выходе дискретного канала передачи $\eta(t_m)$ задаются на реализациях процессов, определяемых стохастическими дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} dx_t &= F(t)x_t dt + \Phi_1(t)dw_t, \\ p_0(t) &= \mathbf{N}\{x; \mu_0, \gamma_0\}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$dz_t = h(t, x_t, x_\tau, z)dt + \Phi_2(t)dv_t, \quad (2)$$

$$\eta(t_m) = g(t_m, x_{t_m}, x_\tau, z) + \Phi_3(t_m)\xi(t_m),$$

т. е. наблюдаемые процессы z_t и $\eta(t_m)$ обладают фиксированной памятью единичной кратности ($N=1, \tau_1=\tau$) с наличием мгновенной бесшумной обратной связи по процессу z_t .

Используемые обозначения: $\mathbf{P}\{\cdot\}$ – вероятность события; $\mathbf{M}\{\cdot\}$ – математическое ожидание; $\mathbf{N}\{a; b\}$ – плотность нормального распределения с параметрами a и b ; $\Phi_1^2(t)=Q(t)$, $\Phi_2^2(t)=R(t)$, $\Phi_3^2(t)=V(t)$.

Задача: в классе кодирующих функционалов $\mathbf{K}=\{\mathbf{H}; \mathbf{G}\}=\{h\{\cdot\}, g\{\cdot\}\}$, удовлетворяющих энергетическим ограничениям

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\{h^2(t, x_t, x_\tau, z)\} &\leq \tilde{h}(t) \leq \tilde{h}, \\ \mathbf{M}\{g^2(t_m, x_{t_m}, x_\tau, z)\} &\leq \tilde{g}(t_m) \leq \tilde{g}, \end{aligned} \quad (3)$$

найти функционалы $h^0(\cdot)$ и $g^0(\cdot)$, обеспечивающие относительно задачи фильтрации минимальную ошибку декодирования $\Delta^0(t)=\inf\Delta(t)$, где $\Delta(t)=\mathbf{M}\{[x_t-\hat{x}(t, z, \eta)]^2\}$ является ошибкой оценки фильтрации $\hat{x}(t, z, \eta)$ процесса x_t , которая соответствует принятому сообщению $\{z_0'; \eta_0^m\}$ при заданных $h\{\cdot\}$, $g\{\cdot\}$. Так как при заданных $h\{\cdot\}$ и $g\{\cdot\}$ оптимальной в среднеквадратическом смысле оценкой фильтрации является апостериорное среднее $\mu(t)=\mathbf{M}\{x_t|z_0', \eta_0^m\}$, то $\Delta(t)\geq\mathbf{M}\{\gamma(t)\}$, где $\gamma(t)\geq\mathbf{M}\{[x_t-\mu(t)]^2|z_0', \eta_0^m\}$. Таким образом, $\Delta^0(t)=\inf\mathbf{M}\{\gamma(t)\}$.

2. Основные результаты

Замечание 1. Считается, что до момента τ задача шла оптимальным способом.

Теорема 1. На классе $\mathbf{K}_\tau=\{\mathbf{H}; \mathbf{G}\}$ линейных функционалов

$$\mathbf{H}_t = \left\{ \begin{aligned} h(\cdot) : h(t, x_t, x_\tau, z) = \\ = h(t, z) + H_0(t, z)x_t + H_1(t, z)x_\tau \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

$$\mathbf{G}_t = \left\{ \begin{aligned} g(\cdot) : g(t_m, x_{t_m}, x_\tau, z) = \\ = g(t_m, z) + G_0(t_m, z)x_{t_m} + G_1(t_m, z)x_\tau \end{aligned} \right\}:$$

1) оптимальные кодирующие функционалы $h^0(\cdot)$, $g^0(\cdot)$ имеют представления

$$\begin{aligned} h^0(t, z^0) &= -H_0^0(t, z^0)\mu^0(t), \\ H_0^0(t, z^0) &= [\tilde{h}(t)/\Delta^0(t)]^{1/2}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} H_1^0(t, z^0) &= 0, \\ g^0(t_m, z^0) &= -G_0^0(t_m, z^0)\mu^0(t_m - 0), \\ G_0^0(t_m, z^0) &= [\tilde{g}(t_m)/\Delta^0(t_m - 0)]^{1/2}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$G_1^0(t_m, z^0) = 0;$$

- 2) оптимальное сообщение $\{z_i^0; \eta^0(t_m)\}$ определяется соотношениями

$$dz_i^0 = [\tilde{h}(t)/\Delta^0(t)]^{1/2}[x_i - \mu^0(t)]dt + \Phi_2(t)dv_i, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \eta^0(t_m) &= [\tilde{g}(t_m)/\Delta^0(t_m - 0)]^{1/2} \times \\ &\times [x_{t_m} - \mu^0(t_m - 0)]dt + \Phi_3(t_m)\xi(t_m); \end{aligned} \quad (8)$$

- 3) оптимальное декодирование $\mu^0(t)$ и минимальная ошибка декодирования $\Delta^0(t)$ на интервалах $t_m \leq t \leq t_{m+1}$ определяются уравнениями

$$d\mu^0(t) = F(t)\mu^0(t)dt + R^{-1}(t)[\tilde{h}(t)\Delta^0(t)]^{1/2}dz_t^0, \quad (9)$$

$$d\Delta^0(t)/dt = [2F(t) - R^{-1}(t)\tilde{h}(t)]\Delta^0(t) + Q(t) \quad (10)$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} \mu^0(t_m) &= \mu^0(t_m - 0) + [\tilde{g}(t_m)\Delta^0(t_m - 0)]^{1/2} \times \\ &\times [V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]^{-1}\eta^0(t_m), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta^0(t_m) = V(t_m)[V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]^{-1}\Delta^0(t_m - 0), \quad (12)$$

где $Q(t) = \Phi_1^2(t)$, $R(t) = \Phi_2^2(t)$, $V(t_m) = \Phi_3^2(t_m)$, $\mu^0(t_m - 0) = \lim_{t \rightarrow t_m^-} \mu(t)$, $\Delta^0(t_m - 0) = \lim_{t \rightarrow t_m^-} \Delta(t)$ при $t \leq t_m$.

Доказательство:

При заданных $\{h(\cdot); g(\cdot)\} \in \mathbf{K}$, на интервалах $t_m \leq t \leq t_{m+1}$ (см. [1]) $\mu^0(t)$ и $\gamma^0(t)$ определяются уравнениями

$$\begin{aligned} d\mu(t) &= F(t)\mu(t)dt + \\ &+ R^{-1}(t)[H_0(t, z)\gamma(t) + H_1(t, z)\gamma_{01}(\tau, t)] \times \\ &\times [dz_t - (h(t, z) + H_0(t, z)\mu(t) + H_1(t, z)\mu(\tau, t))]dt, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} d\gamma(t)/dt &= 2F(t)\gamma(t) - \\ &- R^{-1}(t)[H_0(t, z)\gamma(t) + H_1(t, z)\gamma_{01}(\tau, t)]^2 + Q(t), \end{aligned} \quad (14)$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} \mu(t_m) &= \mu(t_m - 0) + \left[\begin{array}{l} G_0(t_m, z)\gamma(t_m - 0) + \\ + G_1(t_m, z)\gamma_{01}(\tau, t_m - 0) \end{array} \right] \times \\ &\times W^{-1}(t_m) \left[\begin{array}{l} \eta(t_m) - g(t_m, z) - \\ - G_0(t_m, z)\mu(t_m - 0) - \\ - G_1(t_m, z)\mu(\tau, t_m - 0) \end{array} \right], \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \gamma(t_m) &= \gamma(t_m - 0) + \\ &+ \left[\begin{array}{l} G_0(t_m, z)\gamma(t_m - 0) + \\ + G_1(t_m, z)\gamma_{01}(\tau, t_m - 0) \end{array} \right]^2 W^{-1}(t_m), \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \mu(\tau, t) &= \mathbf{M}\{x_\tau | z_0^t, \eta_0^m\}, \\ \gamma_{01}(\tau, t) &= \mathbf{M}\{[x_\tau - \mu(t)][x_\tau - \mu(\tau, t)] | z_0^t, \eta_0^m\}, \\ \gamma_{11}(\tau, t) &= \mathbf{M}\{[x_\tau - \mu(\tau, t)]^2 | z_0^t, \eta_0^m\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W(t_m, z) &= V(t_m) + G_0^2(t_m, z)\gamma(t_m - 0) + \\ &+ G_1^2(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0) + G_1(t_m, z)\gamma_{01}(\tau, t_m - 0) + \\ &+ 2G_0(t_m, z)G_1(t_m, z)\gamma_{01}(\tau, t_m - 0). \end{aligned} \quad (17)$$

Пусть до момента t_m передача шла оптимальным способом. Тогда из (16), (17)

$$\begin{aligned} \gamma(t_m) &= V(t_m)\Delta^0(t_m - 0)(W^0(t_m, z))^{-1} + \\ &+ G_1^2(t_m, z) \left[\begin{array}{l} \Delta^0(t_m - 0)\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0) - \\ - (\Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0))^2 \end{array} \right] \times \\ &\times (W^0(t_m, z))^{-1}, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} W^0(t_m, z) &= V(t_m) + G_0^2(t_m, z)\Delta^0(t_m - 0) + \\ &+ G_1^2(t_m, z)\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0) + \\ &+ G_1(t_m, z)\Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0) + \\ &+ 2G_0(t_m, z)G_1(t_m, z)\Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0). \end{aligned}$$

Для $t < t_m$ по неравенству Коши–Буняковского [2] относительно $\mathbf{M}\{z_0^t, \eta_0^{m-1}\}$ получаем $\gamma(t)\gamma_{11}(\tau, t) - \gamma_{01}^2(\tau, t) \geq 0$. Так как

$$\begin{aligned} &G_0^2(t_m, z)\gamma(t_m - 0) + G_1^2(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0) + \\ &+ 2G_0(t_m, z)G_1(t_m, z)\gamma_{01}(\tau, t_m - 0) = \\ &= \mathbf{M} \left\{ \left[\begin{array}{l} G_0(t_m, z)(x_{t_m} - \mu(t_m - 0)) + \\ + G_1(t_m, z)(x_\tau - \mu(\tau, t_m - 0)) \end{array} \right]^2 \middle| z_0^t, \eta_0^{m-1} \right\} \geq 0, \end{aligned}$$

то $W(t_m, z) \geq 0$. Таким образом из (18)

$$\gamma(t_m) \geq V(t_m)\Delta^0(t_m - 0)(W^0(t_m, z))^{-1}.$$

По неравенству Иенсена [2]

$$\mathbf{M}\{(W^0(t_m, z))^{-1}\} \geq [\mathbf{M}\{W^0(t_m, z)\}]^{-1}.$$

Тогда для $\Delta(t_m) = \mathbf{M}\{\gamma(t_m)\}$ из (17), (19) следует

$$\begin{aligned} \Delta(t_m) &\geq V(t_m)\Delta^0(t_m - 0) \times \\ &\times \left[\begin{array}{l} G_0^2(t_m, z)\Delta^0(t_m - 0) + \\ + G_1^2(t_m, z)\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0) + \\ + 2G_0(t_m, z)G_1(t_m, z)\Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0) \end{array} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (20)$$

Так как $\mathbf{M}\{\cdot\} = \mathbf{M}\{\mathbf{M}\{\cdot | z_0^t, \eta_0^{m-1}\}\}$ [2], то использование (4) в (3) дает

$$\begin{aligned} &\mathbf{M}\{g^2(\cdot)\} = \\ &= \mathbf{M} \left\{ \left[\begin{array}{l} g(t_m, z) + G_0(t_m, z)\mu(t_m - 0) + \\ + G_1(t_m, z)\mu(\tau, t_m - 0) \end{array} \right]^2 \right\} + \\ &\mathbf{M} \left\{ \begin{array}{l} G_0^2(t_m, z)\gamma(t_m - 0) + \\ + G_1^2(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0) + \\ + 2G_0(t_m, z)G_1(t_m, z)\gamma_{01}(\tau, t_m - 0) \end{array} \right\} \leq \tilde{g}(t_m). \end{aligned} \quad (21)$$

Из (20), (21), (12)

$$\Delta(t_m) \geq V(t_m)\Delta^0(t_m - 0)[V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]^{-1} = \Delta^0(t_m). \quad (22)$$

Использование (6) в (18) дает

$$\gamma^0(t_m) = V(t_m)\Delta^0(t_m - 0)[V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]^{-1}.$$

Совпадение $\gamma^0(t_m)$ с нижней границей (22) для $\Delta(t_m)$ доказывает оптимальность кодирования (6), а (8), (11), (12) следуют в результате подстановки (6) в (2), (15), (16) при

$$\{z_0^{t_m}, \eta_0^{m-1}\} = \{(z^0)_0^{t_m}, (\eta^0)_0^{m-1}\}.$$

Прибавление и вычитание в правой части (14) $R^{-1}(t) H_1^2(t, z) \gamma_{11}(\tau, t)$ дает для $t_m \leq t < t_{m-1}$, с учетом того, что в момент t_m используется оптимальный функционал $g^0(\cdot)$, эквивалентное (14) интегральное уравнение

$$\begin{aligned} \gamma(t) = \Delta^0(t_m) \times & \left\{ 2 \int_{t_m}^t F(\sigma) d\sigma - \right. \\ & \times \exp \left\{ - \int_{t_m}^t R^{-1}(\sigma) \left[\begin{array}{l} H_0^2(\sigma, z) \gamma(\sigma) + \\ + H_1^2(\sigma, z) \gamma_{11}(\tau, \sigma) + \\ + 2H_0(\sigma, z) H_1(\sigma, z) \gamma_{01}(\tau, \sigma) \end{array} \right] \times \right. \\ & \left. \times d\sigma + \int_{t_m}^t R^{-1}(\sigma) H_1^2(\sigma, z) \left[\begin{array}{l} \gamma(\sigma) \gamma_{11}(\tau, \sigma) - \\ - \gamma_{01}^2(\tau, \sigma) \end{array} \right] \times \right. \\ & \left. \times \gamma^{-1}(\sigma) d\sigma \right\} + \\ & + \int_{t_m}^t Q(\sigma) \times \\ & \times \exp \left\{ - \int_{t_m}^t R^{-1}(u) \left[\begin{array}{l} 2 \int_{\sigma}^t F(u) du - \\ - \int_{\sigma}^t R^{-1}(u) \left[\begin{array}{l} H_0^2(u, z) \gamma(u) + \\ + H_1^2(u, z) \gamma_{11}(\tau, u) + \\ + 2H_0(u, z) H_1(u, z) \gamma_{01}(\tau, u) \end{array} \right] \times \\ \times du + \int_{\sigma}^t R^{-1}(u) H_1^2(u, z) \left[\begin{array}{l} \gamma(u) \gamma_{11}(\tau, u) - \\ - \gamma_{01}^2(\tau, u) \end{array} \right] \times \\ \times \gamma^{-1}(u) du \end{array} \right] d\sigma, \end{aligned} \quad (23)$$

справедливость которого устанавливается дифференцированием по t . Так как $\mathbf{M}\{\cdot\} = \mathbf{M}\{\mathbf{M}\{\cdot | z_0^{t_m}, \eta_0^m\}\}$ [2], то использование (4) в (3) дает

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\{h^2(\cdot)\} = \mathbf{M} \left\{ \left[\begin{array}{l} h(t, z) + H_0(t, z) \mu(t) + \\ + H_1(t, z) \mu(\tau, t) \end{array} \right]^2 \right\} + \\ + \mathbf{M} \left\{ \begin{array}{l} H_0^2(t, z) \gamma(t) + H_1^2(t, z) \gamma_{11}(\tau, t) + \\ + 2H_0(t, z) H_1(t, z) \gamma_{01}(\tau, t) \end{array} \right\} \leq \tilde{h}(t). \end{aligned} \quad (24)$$

По неравенству Коши–Буняковского относительно $\mathbf{M}\{\cdot | z_0^t, \eta_0^m\}$ получаем $\gamma(t) \gamma_{11}(\tau, t) - \gamma_{01}^2(\tau, t) \geq 0$. Тогда использование неравенства Иенсена $\mathbf{M}\{\varphi(\xi)\} \geq \varphi(\mathbf{M}\{\xi\})$ для выпуклой функции $\varphi(\xi) = \exp\{\xi\}$ в (23) приводит с учетом (24) для $\Delta(t) = \mathbf{M}\{\gamma(t)\}$ к неравенству

$$\begin{aligned} \Delta(t) \geq \Delta^0(t_m) \exp \left\{ \int_{t_m}^t [2F(\sigma) - R^{-1}(\sigma)] d\sigma \right\} + \\ + \int_{t_m}^t Q(\sigma) \exp \left\{ 2 \int_{\sigma}^t [2F(u) - R^{-1}(u)] du \right\} d\sigma, \end{aligned} \quad (25)$$

Использование (5) в (14) приводит для $t_m \leq t < t_{m+1}$ к уравнению

$$\begin{aligned} d\gamma^0(t)/dt = \\ = [2F(t) - R^{-1}(t) \tilde{h}(t) (\gamma^0(t)/\Delta^0(t))] \gamma^0(t) + Q(t), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\gamma^0(t_m) = \Delta^0(t_m).$$

Пусть $\Delta^0(t)$ – правая часть (26). Тогда дифференцирование $\Delta^0(t)$ по t приводит к уравнению (10) с начальным условием $\Delta^0(t_m)$. Очевидно, что решения (10), (26) совпадают, т. е. $\gamma^0(t) = \Delta^0(t)$. Совпадение $\gamma^0(t)$ с нижней границей (25) для $\Delta(t)$ доказывает оптимальность кодирования (5), а (7), (9), (10) следуют в результате подстановки (5) в (2), (13), (14). Справедливость данного результата для произвольного интервала времени $\tau \leq t_m \leq t < t_{m+1}$ следует по индукции с учетом Замечания 1.

Замечание 2. Согласно (5), (6), в классе \mathbf{K}_l при ограничениях (3) в задаче фильтрации вся энергия $\{h(t); \tilde{g}(t_m)\}$ сообщения $\{h^0(\cdot); g^0(\cdot)\}$ сосредоточена относительно сигнала x_t в текущий момент времени, т. к. $H_1^0(t, z) = 0, G_1^0(t_m, z) = 0$. Таким образом, Теорема 1 дает решение и на начальном интервале времени $[0, \tau]$, когда память отсутствует, и Замечание 1 теряет свою актуальность. Задача непрерывной передачи процесса x_t вида (1) при отсутствии памяти решена в [2. Теорема 16.6].

Теорема 2. Кодированные функционалы, оптимальные в классе \mathbf{K}_l линейных функционалов (4), являются оптимальными в общем классе \mathbf{K} нелинейных функционалов.

Доказательство:

Идея доказательства заключается в следующем. Пусть $\Delta_0(t)$ – ошибка декодирования, достигаемая на $\{h(\cdot); g(\cdot)\} \in \mathbf{K}$. Так как $\mathbf{K}_l \subset \mathbf{K}$, то $\Delta_0(t) \leq \Delta^0(t)$, где $\Delta^0(t)$ определена в Теореме 1. Аналогично Теореме 16.5 в [2] доказательство проводится от противного путем доказательства неравенства $\Delta_0(t) \geq \Delta^0(t)$. Тогда противоречие исключается только при условии $\Delta_0(t) = \Delta^0(t)$.

Так как при условиях (1) $p(t, x) = \mathbf{N}\{x; a(t), D(t)\}$ [2], то при произвольном кодировании $\{h(\cdot); g(\cdot)\} \in \mathbf{K}$ Согласно [3] для $t_m \leq t < t_{m+1}$

$$\begin{aligned} I_t[x_t; z_0^t, \eta_0^m] = I_{t_m}[\cdot] + \\ + \frac{1}{2} \left(\int_{t_m}^t R^{-1}(\sigma) \mathbf{M}\{[h(\tau, z | x_\sigma) - \overline{h(\tau, z)}]^2\} d\sigma - \right. \\ \left. - \int_{t_m}^t Q(\sigma) [\mathbf{M}\{J[x_\sigma]\} - D^{-1}(\sigma)] d\sigma \right), \end{aligned} \quad (27)$$

где

$$J[x_t] = \mathbf{M}\{[\partial \ln p_t(x_t)] / \partial x_t\}^2 | z_0^t, \eta_0^m\}.$$

Есть условное информационное количество Фишера [4]. Так как

$$\overline{h(\tau, z)} = \mathbf{M}\{h(\tau, z | x_t)\} | z_0^t, \eta_0^m\},$$

то

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\{[h(\tau, z | x_t) - \overline{h(\tau, z)}]^2\} = \mathbf{M}\{\mathbf{M}\{[\cdot]^2 | z_0^t, \eta_0^m\}\} = \\ = \mathbf{M} \left\{ \mathbf{M} \left\{ \begin{array}{l} h(\tau, z | x_t)^2 + \overline{h(\tau, z)}^2 - \\ - 2h(\tau, z | x_t) \cdot \overline{h(\tau, z)} | z_0^t, \eta_0^m\} \right\} \right\} = \\ = \mathbf{M}\{\overline{h(\tau, z | x_t)^2} - \overline{h(\tau, z)}^2\} \leq \mathbf{M}\{\overline{h(\tau, z | x_t)}^2\}. \end{aligned}$$

По неравенству Иенсена с учетом (3)

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\{\overline{h(\tau, z|x_t)}^2\} &= \mathbf{M}\{\mathbf{M}\{h(\cdot)|x_t, z_0^t, \eta_0^m\}\}^2 \leq \\ &\leq \mathbf{M}\{\mathbf{M}\{h^2(\cdot)|x_t, z_0^t, \eta_0^m\}\} = \mathbf{M}\{h^2(\cdot)\} \leq \tilde{h}(t). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\mathbf{M}\{\overline{h(\tau, z|x_t) - \overline{h(\tau, z)}}\}^2 \leq \tilde{h}(t),$$

и с использованием неравенства Фишера $\mathbf{M}\{J[x_t]\} \geq \Delta^{-1}(t)$ [4] из (27) следует

$$\begin{aligned} I_t[x_t; z_0^t, \eta_0^m] &\leq \\ &\leq I_{t_m}[\cdot] + \frac{1}{2} \left(\int_{t_m}^t R^{-1}(\sigma) \tilde{h}(\sigma) d\sigma - \right. \\ &\quad \left. - \int_{t_m}^t Q(\sigma) [\Delta^{-1}(\sigma) - D^{-1}(\sigma)] d\sigma \right). \end{aligned} \quad (28)$$

Пусть передача проходила в соответствии с кодированием $\{h^0(\cdot); g^0(\cdot)\}$ вида (5), (6). Так как в этом случае $p_t(x) = \mathbf{N}\{x; \mu^0(t), \Delta^0(t)\}$, то из (27) с учетом [3], (5), (6)

$$I_t^0[\cdot] = I_{t_m}^0[\cdot] + \frac{1}{2} \left(\int_{t_m}^t R^{-1}(\sigma) \tilde{h}(\sigma) d\sigma - \int_{t_m}^t Q(\sigma) [(\Delta^0(\sigma))^{-1} - D^{-1}(\sigma)] d\sigma \right). \quad (29)$$

Так как $[\Delta^{-1} - D^{-1}] = [\Delta^{-1} - (\Delta^0)^{-1}] + [(\Delta^0)^{-1} - D^{-1}(\sigma)]$, то при передаче на интервале $t \in [0, t_m]$ в соответствии с кодированием (5), (6), из (28), (29) следует

$$I_t[\cdot] \leq I_{t_m}[\cdot] - \frac{1}{2} \int_{t_m}^t Q(\sigma) [\Delta^{-1}(\sigma) - (\Delta^0(\sigma))^{-1}] d\sigma. \quad (30)$$

Так как, согласно [1, 2] (неравенство Ихары),

$$\Delta(t) \geq D(t) \exp\{-2I_t[\cdot]\}, \quad (31)$$

то из (29), (31)

$$\begin{aligned} \Delta(t) &\geq D(t) \exp\{-2I_t^0[\cdot]\} \times \\ &\times \exp\left\{ \int_{t_m}^t Q(\sigma) [\Delta^{-1}(\sigma) - (\Delta^0(\sigma))^{-1}] d\sigma \right\}. \end{aligned} \quad (32)$$

Так как $K_t \subset K$, то $\Delta_0(t) \leq \Delta^0(t)$, т. е. $\Delta_0^{-1}(t) \geq (\Delta^0(t_m))^{-1}$. Из [3] при $p(t, x) = \mathbf{N}\{x, a(t), D(t)\}$, $p_t(x) = \mathbf{N}\{x, \mu^0(t), \Delta^0(t)\}$ следует $I_t^0[\cdot] = (1/2) \ln[D(t)/\Delta(t)]$. Таким образом, (32) при $\Delta(t) = \Delta_0(t)$ приводит к требуемому противоречию $\Delta_0(t) \geq \Delta^0(t)$. Завершается доказательство теоремы выводом противоречивого неравенства $\Delta_0(t_m) \geq \Delta^0(t_m)$ в предположении, что на интервале $t \in [0, t_m]$ передача происходила в соответствии с кодированием $\{h^0(\cdot); g^0(\cdot)\}$ вида (5), (6). Из (31) с учетом [3] $\Delta(t_m) \geq D(t_m) \exp\{-2I_{t_m-0}^0[\cdot]\} \exp\{-2\Delta I_{t_m}^0[\cdot]\}$. Так как $p_{t_m-0}(x) = \mathbf{N}\{x; \mu^0(t_m-0), \Delta^0(t_m-0)\}$ [2] при $\{h(\cdot); g(\cdot)\} = \{h^0(\cdot); g^0(\cdot)\}$, то $I_{t_m-0}^0[\cdot] = (1/2) \ln[D(t_m)/\Delta^0(t_m-0)]$ и, таким образом, $\Delta(t_m) \geq \Delta^0(t_m-0) \exp\{-2\Delta I_{t_m}^0[\cdot]\}$. Умножение слева и справа последнего неравенства на $V(t_m)[V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]^{-1}$ дает с учетом (12)

$$\begin{aligned} \Delta(t_m) &\geq \Delta^0(t_m-0) V^{-1}(t_m) \times \\ &\times [V(t_m) + \tilde{g}(t_m)] \exp\{-2\Delta I_{t_m}^0[\cdot]\}. \end{aligned} \quad (33)$$

Из [3] с использованием неравенства Иенсена и учетом того, что $\exp\{-y\} \leq (1-y)^{-1}$, $\ln\{y\} \leq y-1$ следует

$$\Delta I_{t_m}^0[\cdot] \leq (1/2) \ln[1 + \tilde{g}(t_m)/V(t_m)]. \quad (34)$$

Использование (34) в (33) приводит при $\Delta(t_m) = \Delta_0(t_m)$ к требуемому противоречию $\Delta_0(t_m) \geq \Delta^0(t_m)$. Справедливость доказанного результата для произвольного интервала $\tau \leq t_m \leq t \leq t_{m+1}$ следует по индукции с учетом Замечания 2.

Теорема 3. Пусть $I_t^0[x_t; (z_0^t)^\dagger, (\eta_0^t)^\dagger]$ есть количество информации, достигаемое на кодирующих функционалах (5), (6). Тогда имеет место свойство

$$I_t^0[x_t; (z_0^t)^\dagger, (\eta_0^t)^\dagger] = \sup I_t[x_t; z_0^t, \eta_0^t], \quad (35)$$

где \sup берется по всем $\{h(\cdot); g(\cdot)\} \in \mathbf{K} = \{\mathbf{H}; \mathbf{G}\}$ и

$$\begin{aligned} I_t^0[x_t; (z_0^t)^\dagger, (\eta_0^t)^\dagger] &= \\ &= (1/2) \sum_{t_i \leq t} \ln[1 + (\tilde{g}(t_i)/V(t_i))] + \\ &+ (1/2) \left[\int_0^t \left(R^{-1}(\sigma) \tilde{h}(\sigma) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - Q(\sigma) [(\Delta^0(\sigma))^{-1} - D^{-1}(\sigma)] \right) d\sigma \right], \end{aligned} \quad (36)$$

а $D(t) = \mathbf{M}\{x_t - a(t)\}^2$, $a(t) = \mathbf{M}\{x_t\}$.

Доказательство:

Из (27) с учетом [3] для $\tau \leq t_i \leq t_m \leq t$ следует

$$\begin{aligned} I_t[x_t; z_0^t, \eta_0^t] &= \\ &= (1/2) \sum_{\tau \leq t_i \leq t} \mathbf{M}\{\ln[C(\eta(t_i), z|x_t)/C(\eta(t_i), z)]\} + \\ &+ (1/2) \left(\int_{t_m}^t R^{-1}(\sigma) \mathbf{M}\{\overline{h(\tau, z|x_\sigma)} - \overline{h(\tau, z)}\}^2 d\sigma - \right. \\ &\quad \left. - \int_{t_m}^t Q(\sigma) [\mathbf{M}\{J[x_\sigma]\} - D^{-1}(\sigma)] d\sigma \right), \end{aligned} \quad (37)$$

где $J[x_\sigma]$ – упомянутое выше условное информационное количество Фишера. Использование (28), (30), (34) в (37) дает, что $I_t[x_t; z_0^t, \eta_0^t] \leq I_t^0[\cdot]$, где $I_t^0[\cdot]$ определяется правой частью формулы (36). Использование [3], (5), (6), (12), (16) в (37) дает, что верхняя граница $I_t^0[\cdot]$ для $I_t[\cdot]$ достигается на кодирующих функционалах $h^0(\cdot)$ и $g^0(\cdot)$ вида (5), (6). Следовательно (35) доказано для начального интервала времени $[0, \tau]$ следует с учетом Замечания 2.

Заключение

Полученные результаты могут быть использованы для анализа пропускной способности каналов в задаче оптимальной передачи сигналов, и в частности непрерывно-дискретных сигналов, реализациями которых являются случайные процессы.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013, проект № 14.В37.21.0861.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин Н.С., Рожкова С.В., Рожкова О.В. Обобщенная скользящая экстраполяция стохастических процессов по совокупности непрерывных и дискретных наблюдений с памятью // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2000. – № 4. – С. 39–51.
2. Липцер Р.Ш., Ширяев А. Н. Статистика случайных процессов. – М.: Наука, 1974. – 696 с.
3. Dyomin N.S., Rozhkova S.V., Safronova I.E. About structure of Shannon information amount for joint filtering and extrapolation

problem by continuous-discrete memory observations // Informatica. – 2004. – V.15. – № 2. – P. 171–202.

4. Липцер Р.Ш. Оптимальное кодирование и декодирование при передаче гауссовского марковского сигнала по каналу с бесшумной обратной связью // Проблемы передачи информации. – 1974. – № 4. – С. 3–15.

Поступила 03.10.2012 г.

УДК 519.2

ОПТИМАЛЬНАЯ НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНАЯ ПЕРЕДАЧА СИГНАЛА ПО КАНАЛАМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

С.В. Рожкова

Томский политехнический университет
E-mail: rozhkova@tpu.ru

Рассматривается задача оптимальной передачи стохастических процессов по непрерывно-дискретным каналам с запаздыванием. Доказываются экстремальные свойства оптимальных кодирований в смысле максимизации количества информации.

Ключевые слова:

Сигнал, стохастические системы, канал передачи, кодирование, декодирование.

Key words:

Signal, stochastic system, transmission channel, coding, decoding.

1. Постановка задачи

Сигнал x_t , сообщение на выходе канала передачи z_t и сообщение на выходе дискретного канала передачи $\eta(t_m)$ задаются на реализациях процессов, определяемых стохастическими дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} dx_t &= F(t)x_t dt + \Phi_1(t)dw_t, \\ p_0(x) &= \mathbf{N}\{x; \mu_0, \gamma_0\}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$dz_t = h(t, x_t, z)dt + \Phi_2(t)dv_t, \quad (2)$$

$$\eta(t_m) = g(t_m, x_t, z) + \Phi_3(t_m)\xi(t_m),$$

$0 \leq t_0 < \tau \leq t_m \leq t$, т. е. в отличие от [1] в данной работе рассматривается случай непрерывно-дискретной передачи с запаздыванием, когда в непрерывном и дискретном каналах передаются прошлые значения x_t процесса x_t при наличии мгновенной бесшумной обратной связи по процессу z_t .

Используемые обозначения: $\mathbf{P}\{\cdot\}$ – вероятность события; $\mathbf{M}\{\cdot\}$ – математическое ожидание; $\mathbf{N}\{a; b\}$ – плотность нормального распределения с параметрами a и b ; $\Phi_1^2(t) = Q(t)$, $\Phi_2^2(t) = R(t)$, $\Phi_3^2(t_m) = V(t_m)$.

Задача: в классе кодирующих функционалов $\mathbf{K}^1 = \{\mathbf{H}^1; \mathbf{G}^1\} = \{h\{\cdot\}; g\{\cdot\}\}$, удовлетворяющих энергетическим ограничениям

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\{h^2(t, x_t, z)\} &\leq \tilde{h}(t), \\ \mathbf{M}\{g^2(t_m, x_t, z)\} &\leq \tilde{g}(t_m), \end{aligned} \quad (3)$$

найти функционалы $h^0\{\cdot\}$ и $g^0\{\cdot\}$, обеспечивающие относительно задачи фильтрации минимальную ошибку декодирования $\Delta^0(t) = \inf \Delta(t)$, где $\Delta(t) = \mathbf{M}\{[x_t - \hat{x}(t, z, \eta)]^2\}$ является ошибкой оценки фильтрации $\hat{x}(t, z, \eta)$ процесса x_t , которая соответствует принятому сообщению $\{z_0; \eta_0^m\}$ при заданных $h\{\cdot\}$, $g\{\cdot\}$. Так как при заданных $h\{\cdot\}$ и $g\{\cdot\}$ оптимальной в среднеквадратическом смысле оценкой фильтрации является апостериорное среднее $\mu(t) = \mathbf{M}\{x_t | z_0^t, \eta_0^m\}$ [2], то $\Delta(t) \geq \mathbf{M}\{\gamma(t)\}$, где $\gamma(t) \geq \mathbf{M}\{[x_t - \mu(t)]^2 | z_0^t, \eta_0^m\}$. Таким образом, $\Delta^0(t) = \inf \mathbf{M}\{\gamma(t)\}$.

2. Основные результаты

Замечание 1. Очевидно, что до момента τ , где $0 \leq t_0 < \tau \leq t_m \leq t$, мы имеем $h(\cdot) = h(t, x_t, z)$, $g(\cdot) = h(t_m, x_{t_m}, z)$, т. е. передаются текущие значения процесса x_t , справедливо Замечание 2 из [1]. Считаем, что при $\tau < t$ передача шла оптимальным способом согласно этому Замечанию.

Теорема 1. На классе $\mathbf{K}_l^1 = \{\mathbf{H}_l^1; \mathbf{G}_l^1\}$ линейных функционалов

$$\mathbf{H}_l^1 = \{h(\cdot) : h(t, x_t, z) = h(t, z) + H_1(t, z)x_t\}, \quad (4)$$

$$\mathbf{G}_l^1 = \{g(\cdot) : g(t_m, x_t, z) = g(t_m, z) + G_1(t_m, z)x_t\} :$$

1) оптимальные кодирующие функционалы $h^0(t, x_t, z^0)$, $g^0(t_m, x_t, z^0)$ имеют представления

$$\begin{aligned} h^0(t, z^0) &= -H_1^0(t, z^0)\mu^0(\tau, t), \\ H_1^0(t, z^0) &= [\tilde{h}(t) / \Delta_{H_1}^0(\tau, t)]^{1/2}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} g^0(t_m, z^0) &= -G_1^0(t_m, z^0)\mu^0(\tau, t_m - 0), \\ G_1^0(t_m, z^0) &= [\tilde{g}(t_m)/\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0)]^{1/2}, \end{aligned} \quad (6)$$

2) оптимальное сообщение $\{z_i^0; \eta^0(t_m)\}$ определяется соотношениями

$$dz_i^0 = [\tilde{h}(t)/\Delta_{11}^0(\tau, t)]^{1/2}[x_\tau - \mu^0(\tau, t)]dt + \Phi_2(t)dv_i, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \eta^0(t_m) &= [\tilde{g}(t_m)/\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0)]^{1/2} \times \\ &\times [x_\tau - \mu^0(\tau, t_m - 0)]dt + \Phi_3(t_m)\xi(t_m); \end{aligned} \quad (8)$$

3) оптимальное декодирование $\mu^0(t)$ и минимальная ошибка декодирования $\Delta_0^0(t)$ на интервалах $t_m \leq t < t_{m+1}$, определяются уравнениями

$$\begin{aligned} d\mu^0(t) &= F(t)\mu^0(t)dt + \\ &+ R^{-1}(t)[\tilde{h}(t)/\Delta_{11}^0(\tau, t)]^{1/2}\Delta_{01}^0(\tau, t)dz_i^0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} d\Delta^0(t)/dt &= \\ &= \left(\begin{aligned} &2F(t) - R^{-1}(t)\tilde{h}(t) \times \\ &\times [(\Delta_{01}^0(\tau, t))^2 / \Delta^0(t)\Delta_{11}^0(\tau, t)] \end{aligned} \right) \Delta^0(t) + Q(t) \end{aligned} \quad (10)$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} \mu^0(t_m) &= \mu^0(t_m - 0) + \\ &+ \Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0)[\tilde{g}(t_m)\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0)]^{1/2} \times \\ &\times [V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]^{-1}\eta^0(t_m), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta^0(t_m) &= \Delta^0(t_m - 0) \frac{V(t_m)}{[V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]} \times \\ &\times \left[1 + \frac{\tilde{g}(t_m)}{V(t_m)} \left(1 - \frac{(\Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0))^2}{\Delta^0(t_m - 0)\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0)} \right) \right], \end{aligned} \quad (12)$$

где $Q(t) = \Phi_1^2(t)$, $R(t) = \Phi_2^2(t)$, $V(t_m) = \Phi_3^2(t_m)$;

$$\begin{aligned} 4) \quad \mu^0(\tau, t) &= \mathbf{M}\{x_\tau | (z^0)_0^t, (\eta^0)_0^m\}, \\ \Delta_{11}^0(\tau, t) &= \mathbf{M}\{[x_\tau - \mu^0(\tau, t)]^2\}, \\ \Delta_{01}^0(\tau, t) &= \mathbf{M}\{[x_\tau - \mu^0(t)][x_\tau - \mu^0(t)\tau, t]\} \end{aligned}$$

на интервалах $t_m \leq t < t_{m+1}$ определяются уравнениями

$$d\mu^0(\tau, t) = R^{-1}(t)[\tilde{h}(t)\Delta_{11}^0(\tau, t)]^{1/2}dz_i^0, \quad (13)$$

$$d\Delta_{11}^0(\tau, t)/dt = -R^{-1}(t)\tilde{h}(t)\Delta_{11}^0(\tau, t), \quad (14)$$

$$d\Delta_{01}^0(\tau, t)/dt = [F(t) - R^{-1}(t)\tilde{h}(t)]\Delta_{01}^0(\tau, t) \quad (15)$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} \mu^0(\tau, t_m) &= \mu^0(\tau, t_m - 0) + \\ &+ [\tilde{g}(t_m)\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0)]^{1/2} \times \\ &\times [V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]^{-1}\eta^0(t_m), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\Delta_{11}^0(\tau, t_m) = V(t_m)[V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]^{-1}\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0), \quad (17)$$

$$\Delta_{01}^0(\tau, t_m) = V(t_m)[V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]^{-1}\Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0). \quad (18)$$

Доказательство:

При заданных $\{h(\cdot); g(\cdot)\} \in \mathbf{K}_l^1$ на интервалах $t_m \leq t < t_{m+1}$ (см. [1]) $\mu(t)$ и $\gamma(t)$ определяются уравнениями

$$d\mu(t) = F(t)\mu(t)dt + R^{-1}(t)H_1(t, z)\gamma_{01}(\tau, t)dz_i, \quad (19)$$

$$d\gamma(t)/dt =$$

$$= 2F(t)\gamma(t) - R^{-1}(t)H_1^2(t, z)\gamma_{01}^2(\tau, t) + Q(t) \quad (20)$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} \mu(t_m) &= \mu(t_m - 0) + G_1(t_m, z)\gamma_{01}(\tau, t_m - 0) \times \\ &\times [V(t_m) + G_1^2(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0)]^{-1}\tilde{\eta}(t_m), \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \gamma(t_m) &= \gamma(t_m - 0) - G_1^2(t_m, z)\gamma_{01}^2(\tau, t_m - 0) \times \\ &\times [V(t_m) + G_1^2(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0)]^{-1}, \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$\mu(\tau, t) = \mathbf{M}\{x_\tau | z_0^t, \eta_0^m\},$$

$$\gamma_{01}(\tau, t) = \mathbf{M}\{[x_\tau - \mu(t)][x_\tau - \mu(\tau, t)] | z_0^t, \eta_0^m\},$$

$$\gamma_{11}(\tau, t) = \mathbf{M}\{[x_\tau - \mu(\tau, t)]^2 | z_0^t, \eta_0^m\},$$

$$d\tilde{z}_i = dz_i - [h(t, z) + H_1(t, z)\mu(\tau, t)]dt, \quad (23)$$

$$\tilde{\eta}(t_m) = \eta(t_m) - [g(t_m, z) + G_1(t_m, z)\mu(\tau, t_m - 0)].$$

Так как $\mathbf{M}\{\cdot\} = \mathbf{M}\{\mathbf{M}\{z_0^t, \eta_0^{m-1}\}\}$ [2], то использование (4) в (3) дает

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\{g^2(\cdot)\} &= \\ &= \mathbf{M}\{[g(t_m, z) + G_1g(t_m, z)\mu(\tau, t_m - 0)]^2\} + \\ &+ \mathbf{M}\{G_1^2g(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0)\} \leq \tilde{g}(t_m). \end{aligned} \quad (24)$$

Формула (22) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \gamma(t_m) &= \gamma(t_m - 0) - \frac{\gamma_{01}^2(\tau, t_m - 0)}{\gamma_{11}(\tau, t_m - 0)} + \frac{\gamma_{01}^2(\tau, t_m - 0)}{\gamma_{11}(\tau, t_m - 0)} \times \\ &\times \frac{V(t_m)}{[V(t_m) + G_1^2(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0)]}. \end{aligned} \quad (25)$$

Пусть до момента $t < t_m$ передача шла оптимальным способом. Тогда $\gamma(t_m - 0)$, $\gamma_{11}(\tau, t_m - 0)$ и $\gamma_{01}(\tau, t_m - 0)$ могут быть заменены на $\Delta(t_m - 0)$, $\Delta_{11}(\tau, t_m - 0)$ и $\Delta_{01}(\tau, t_m - 0)$, которые не являются случайными. В этом случае из (24), (25) для $\Delta(t_m) = \mathbf{M}\{\gamma(t_m)\}$ с учетом неравенства Иенсена $\mathbf{M}\{Y^2\} \geq (\mathbf{M}\{Y\})^2$ [2] получаем

$$\begin{aligned} \Delta(t_m) &\geq \Delta^0(t_m - 0) + \frac{(\Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0))^2}{\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0)} + \\ &+ \frac{(\Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0))^2}{\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0)} \frac{V(t_m)}{[V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]} = \\ &= \Delta^0(t_m - 0) \frac{V(t_m)}{[V(t_m) + \tilde{g}(t_m)]} \times \\ &\times \left[1 + \frac{\tilde{g}(t_m)}{V(t_m)} \left(1 - \frac{(\Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0))^2}{\Delta^0(t_m - 0)\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0)} \right) \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

Использование (6) в (25) дает, что $\gamma^0(t_m) = \Delta^0(t_m)$, которое определяется формулой (12). Из (12), (26) следует, что совпадение $\gamma^0(t_m)$ с нижней границей

для $\Delta(t_m)$ доказывает оптимальность кодирования (6), а (8), (11), (12) следуют в результате подстановки (6) в (2), (21), (22) с учетом (23). При заданных $\{h(\cdot); g(\cdot)\} \in \mathbf{K}_1^1$ на интервалах $t_m \leq t < t_{m+1}$ (см. [3])

$$d\mu(\tau, t) = R^{-1}(t)H_1(t, z)\gamma_{11}(\tau, t)d\tilde{z}, \quad (27)$$

$$d\gamma_{11}(\tau, t)/dt = -R^{-1}(t)H_1^2(t, z)\gamma_{11}^2(\tau, t), \quad (28)$$

$$\begin{aligned} d\gamma_{01}(\tau, t)/dt = \\ = [F(t) - R^{-1}(t)H_1^2(t, z)\gamma_{11}(\tau, t)]\gamma_{01}(\tau, t) \end{aligned} \quad (29)$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} \mu(\tau, t_m) = \mu(\tau, t_m - 0) + G_1(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0) \times \\ \times [V(t_m) + G_1^2(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0)]^{-1}\tilde{\eta}(t_m), \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{11}(\tau, t_m) = \gamma_{11}(\tau, t_m - 0) - G_1^2(t_m, z)\gamma_{11}^2(\tau, t_m - 0) \times \\ \times [V(t_m) + G_1^2(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0)]^{-1}, \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{01}(\tau, t_m) = \gamma_{01}(\tau, t_m - 0) - \\ - G_1^2(t_m, z)\gamma_{01}(\tau, t_m - 0)\gamma_{01}(\tau, t_m - 0) \times \\ \times [V(t_m) + G_1^2(t_m, z)\gamma_{11}(\tau, t_m - 0)]^{-1}. \end{aligned} \quad (32)$$

Подстановка (6) в (30)–(32) с учетом (23) дает (16)–(18).

Представим уравнение (20) в виде

$$\begin{aligned} d\gamma(t)/dt = \\ = \left(2F(t) - R^{-1}(t)H_1^2(t, z) \times \right. \\ \left. \times \gamma_{11}(\tau, t) \left[\gamma_{01}^2(\tau, t) / \gamma(t)\gamma_{11}(\tau, t) \right] \right) \gamma(t) + Q(t). \end{aligned} \quad (33)$$

Пусть до момента $t < t_m$ передача шла оптимальным способом. Тогда дифференциальное уравнение (33) на интервалах $t_m \leq t < t_{m+1}$ эквивалентно интегральному уравнению

$$\begin{aligned} \gamma(t) = \Delta^0(t_m) \times \\ \times \exp \left\{ \int_{t_m}^t \left(2F(\sigma) - R^{-1}(\sigma)H_1^2(\sigma, z) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \gamma_{11}(\tau, \sigma) \left[\frac{\gamma_{01}^2(\tau, \sigma)}{\gamma(\sigma)\gamma_{11}(\tau, \sigma)} \right] \right) d\sigma \right\} + \\ + \int_{t_m}^t Q(\sigma) \times \\ \times \exp \left\{ \int_{t_m}^t \left(2F(u) - R^{-1}(u)H_1^2(u, z) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \gamma_{11}(\tau, u) \left[\frac{\gamma_{01}^2(\tau, u)}{\gamma(u)\gamma_{11}(\tau, u)} \right] \right) du \right\} d\sigma, \end{aligned} \quad (34)$$

справедливость которого устанавливается дифференцированием по t . Так как $\mathbf{M}\{\cdot\} = \mathbf{M}\{\mathbf{M}\{\cdot | z_0^t, \eta_0^m\}\}$ [2], то использование (4) в (3) дает

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(h^2(\cdot)) = \mathbf{M}\{[h(t, z) + H_1(t, z)\mu(\tau, t)]^2\} + \\ + \mathbf{M}\{H_1^2(t, z)\gamma_{11}(\tau, t)\} \leq \tilde{h}(t_m). \end{aligned} \quad (35)$$

Использование неравенства Иенсена $\mathbf{M}\{\varphi(Y)\} \geq \varphi(\mathbf{M}\{Y\})$ [2] для выпуклой функции $\varphi(y) = \exp\{y\}$ в (34) приводит к неравенству для $\Delta(t) = \mathbf{M}\{\gamma(t)\}$ вида

$$\begin{aligned} \Delta(t) \geq \Delta^0(t_m) \times \\ \times \exp \left\{ \int_{t_m}^t \left(2F(\sigma) - R^{-1}(\sigma)H_1^2(\sigma, z) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \mathbf{M}\left\{ \gamma_{11}(\tau, \sigma) \left[\frac{\gamma_{01}^2(\tau, \sigma)}{\gamma(\sigma)\gamma_{11}(\tau, \sigma)} \right] \right\} \right) d\sigma \right\} + \\ + \int_{t_m}^t Q(\sigma) \times \\ \times \exp \left\{ \int_{t_m}^t \left(2F(u) - R^{-1}(u) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \mathbf{M}\left\{ H_1^2(u, z) \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times \gamma_{11}(\tau, u) \left[\frac{\gamma_{01}^2(\tau, u)}{\gamma(u)\gamma_{11}(\tau, u)} \right] \right\} \right) du \right\} d\sigma, \end{aligned} \quad (36)$$

Использование (5) в (20), (28), (29) приводит к уравнениям для $\gamma^0(t)$, $\gamma_{11}^0(\tau, t)$, $\gamma_{01}^0(\tau, t)$ на интервалах $t_m \leq t < t_{m+1}$ вида

$$\begin{aligned} d\gamma^0(t)/dt = \\ = \left(2F(t) - R^{-1}(t)\tilde{h}(t) \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{(\gamma_{01}^0(\tau, t))^2}{\gamma^0(t)\Delta_{11}^0(\tau, t)} \right] \right) \gamma^0(t) + Q(t), \end{aligned} \quad (37)$$

$$\gamma^0(t_m) = \Delta^0(t_m),$$

$$d\gamma_{11}^0(\tau, t)/dt = -R^{-1}(t)\tilde{h}(t)[(\gamma_{11}^0(\tau, t))^2 / \Delta_{11}^0(\tau, t)], \quad (38)$$

$$\gamma_{11}^0(\tau, t_m) = \Delta_{11}^0(\tau, t_m),$$

$$d\gamma_{01}^0(\tau, t)/dt = \left(F(t) - R^{-1}(t)\tilde{h}(t) \times \right. \\ \left. \times [(\gamma_{11}^0(\tau, t))^2 / \Delta_{11}^0(\tau, t)] \right) \gamma_{01}^0(\tau, t), \quad (39)$$

$$\gamma_{01}^0(\tau, t_m) = \Delta_{01}^0(\tau, t_m).$$

Уравнения (37)–(39) дают, что $\gamma^0(t)$, $\gamma_{11}^0(\tau, t)$, $\gamma_{01}^0(\tau, t)$ являются не случайными величинами. Согласно (35), получаем $\mathbf{M}\{H_1^2(t, z)\}\gamma_{11}^0(\tau, t) \leq \tilde{h}(t)$. Тогда из (36) следует

$$\begin{aligned} \Delta(t) \geq \Delta^0(t_m) \times \\ \times \exp \left\{ \int_{t_m}^t \left(2F(\sigma) - R^{-1}(\sigma)\tilde{h}(\sigma) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[\frac{(\gamma_{01}^0(\tau, \sigma))^2}{\gamma^0(\sigma)\gamma_{11}^0(\tau, \sigma)} \right] \right) d\sigma \right\} + \\ + \int_{t_m}^t Q(\sigma) \times \\ \times \exp \left\{ \int_{t_m}^t \left(2F(u) - R^{-1}(u)\tilde{h}(u) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[\frac{(\gamma_{01}^0(\tau, u))^2}{\gamma^0(u)\gamma_{11}^0(\tau, u)} \right] \right) du \right\} d\sigma. \end{aligned} \quad (40)$$

Пусть $\Delta^0(t)$ – правая часть (40). Тогда дифференцирование по t дает, что $\Delta^0(t)$ определяется уравнением

$$\begin{aligned} d\Delta^0(t)/dt = \\ = \left(2F(t) - R^{-1}(t)\tilde{h}(t) \times \right. \\ \left. \times [(\gamma_{01}^0(\tau, t))^2 / \gamma^0(t)\gamma_{11}^0(\tau, t)] \right) \Delta^0(t) + Q(t), \end{aligned} \quad (41)$$

$$\Delta^0(t)|_{t=t_m} = \Delta^0(t_m).$$

Из (14), (38) и (15), (39) следует, что решения этих уравнений совпадают, т. е. $\gamma_{11}^0(\tau, t) = \Delta_{11}^0(\tau, t)$, $\gamma_{01}^0(\tau, t) = \Delta_{01}^0(\tau, t)$. Поэтому решения (37) и (41), (10) также совпадают, т. е. $\gamma^0(t) = \Delta^0(t)$. Совпадение $\gamma^0(t)$ с нижней границей для $\Delta(t)$ доказывает оптимальность кодирования (5). Уравнения (7), (9), (13) следуют в результате подстановки (5) в (2), (19), (27). Справедливость данного результата для произвольного интервала времени $\tau \leq t_m \leq t < t_{m+1}$ следует по индукции с учетом Замечания [1] и Замечания 2 из [1].

Теорема 2. Пусть $I_t^0[x; (z^0)_0^t, (\eta^0)_0^m]$ есть количество информации, достигаемое на кодирующих функционалах (5), (6). Тогда имеет место свойство

$$I_t^0[x; (z^0)_0^t, (\eta^0)_0^m] = \sup I_t[x; z_t^t, \eta_t^m], \quad (42)$$

где \sup берется по всем $\{h(\cdot); g(\cdot)\} \in \mathbf{K}_t^1$ и

$$I_t^0[x; (z^0)_0^t, (\eta^0)_0^m] = \frac{1}{2} \sum_{\tau \leq t_i \leq t} \ln \left[\begin{array}{l} \left[1 + \frac{\tilde{g}(t_i)}{V(t_i)} \right] \times \\ \left[1 + \frac{\tilde{g}(t_i)}{V(t_i)} \right] \times \\ \times \left(1 - \frac{(\Delta_{01}^0(\tau, t_i - 0))^2}{\Delta^0(t_i - 0)\Delta_{11}^0(\tau, t_i - 0)} \right) \end{array} \right]^{-1} + \frac{1}{2} \int \left[\begin{array}{l} \frac{\tilde{h}(\sigma)}{R(\sigma)} \frac{(\Delta_{01}^0(\tau, \sigma))^2}{\Delta^0(\sigma)\Delta_{11}^0(\tau, \sigma)} - \\ - Q(\sigma) \left(\frac{1}{\Delta^0(\sigma)} - \frac{1}{D(\sigma)} \right) \end{array} \right] d\sigma, \quad (43)$$

а $D(t) = \mathbf{M}\{[x_t - a(t)]^2\}$, $a(t) = \mathbf{M}\{x_t\}$.

Доказательство:

Используя неравенства Ихары [2] $\Delta(t) \geq D(t) \exp\{-2I_t[\cdot]\}$, получаем

$$I_t[\cdot] \leq (1/2) \ln[D(t)/\Delta(t)]. \quad (44)$$

Так как, согласно Теореме 1, $\inf(t) = \Delta^0(t)$, тогда из (44)

$$\begin{aligned} \sup I_t[x; z_t^t, \eta_t^m] &= I_t^0[x; (z^0)_0^t, (\eta^0)_0^m] = \\ &= \frac{1}{2} \ln \left[\frac{D(t)}{\Delta^0(t)} \right]. \end{aligned} \quad (45)$$

Так как на кодированиях (5) и (6) имеем, что $p(x) = \mathbf{N}\{x; \mu^0(t), \Delta^0(t)\}$ и $p(t, x) = \mathbf{N}\{x; a(t), D(t)\}$, то

$$\begin{aligned} I_t^0[\cdot] &= \mathbf{M}\{\ln[p_t(x_t)/p(t, x_t)]\} = \\ &= (1/2) \ln[D(t)/\Delta^0(t)]. \end{aligned} \quad (46)$$

Совпадение (45) с (46) доказывает свойство (42). Из (46) следует, что

$$\frac{I_t^0[\cdot]}{dt} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{D(t)} \frac{dD(t)}{dt} - \frac{1}{\Delta^0(t)} \frac{d\Delta^0(t)}{dt} \right]. \quad (47)$$

Так как для гауссовского процесса x_t , определяемого уравнением (1), мы имеем

$$dD(t)/dt = 2F(t)D(t) + Q(t), \quad (48)$$

тогда использование (10), (48) в (47) для $t_m \leq t < t_{m+1}$ дает

$$\frac{I_t^0[\cdot]}{dt} = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} \frac{\tilde{h}(t)}{R(t)} \frac{(\Delta_{01}^0(\tau, t))^2}{\Delta^0(t)\Delta_{11}^0(\tau, t)} - \\ - Q(t) \left(\frac{1}{\Delta^0(t)} - \frac{1}{D(t)} \right) \end{array} \right]. \quad (49)$$

Из (46) следует, что

$$I_{t_m}^0[\cdot] \leq (1/2) \ln[D(t_m)/\Delta^0(t_m)]. \quad (50)$$

Используя (12) в (50), получаем

$$I_{t_m}^0[\cdot] = I_{t_m-0}^0[\cdot] + \frac{1}{2} \ln \left[\begin{array}{l} \left[1 + \frac{\tilde{g}(t_m)}{V(t_m)} \right] \times \\ \left[1 + \frac{\tilde{g}(t_m)}{V(t_m)} \right] \times \\ \times \left(1 - \frac{(\Delta_{01}^0(\tau, t_m - 0))^2}{\Delta^0(t_m - 0)\Delta_{11}^0(\tau, t_m - 0)} \right) \end{array} \right]^{-1}. \quad (51)$$

Формула (43) очевидно следует из (49), (51).

Замечание 1. Использование (4)–(6) в (3) дает, что $\mathbf{M}\{[h^0(t, x_t, z^0)]^2\} = \tilde{h}(t)$, $\mathbf{M}\{[g^0(t_m, x_t, z^0)]^2\} = \tilde{g}(t_m)$, т. е. при оптимальном способе передачи энергетические возможности каналов передачи используются полностью.

Замечание 2. Поскольку пропускная способность $C[0, T]$ канала передачи определяется в виде $C[0, T] = \sup\{(1/T)I_T[\cdot]\}$ [4], то согласно Теореме 2 при непрерывно-дискретном способе передачи (1)–(3) кодирующие функционалы (5), (6) обеспечивают передачу максимально возможного количества информации в классе \mathbf{K}_t^1 линейных функционалов (4).

Заключение

Полученные результаты могут использоваться при разработке систем связи, систем передачи информации, функционирование которых происходит в условиях непрерывно-дискретной во времени доступной измерению (наблюдению) или поступающей в каналы передачи информации, например, когда непрерывно во времени поступают сигналы бортовых измерителей, а в отдельные моменты времени – сигналы от внешних источников.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013, проект № 14.В37.21.0861.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожкова С.В. Оптимальная непрерывно-дискретная передача сигнала по каналам с памятью при наличии бесшумной обратной связи // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. – № 5. – С. 6–10.
2. Липцер Р.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов. – М.: Наука, 1974. – 696 с.
3. Демин Н.С., Рожкова С.В., Рожкова О.В. Обобщенная скользящая экстраполяция стохастических процессов по совокуп-

- ности непрерывных и дискретных наблюдений с памятью // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2000. – № 4. – С. 39–51.
4. Gallager R.G. Information theory and reliable communication. – New York: Wiley, 1968 – 346 p.

Поступила 03.10.2012 г.

УДК 681.51

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В СТРОГО-ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ

С.Ш. Баласанян

Государственный инженерный университет Армении, г. Капан, Армения
E-mail: suni-com@syunik.am

Разработана компьютерная модель сопряжения элементов в строго-иерархической стратифицированной системе, позволяющая свести имитацию сопряжения элементов смежных страт, т. е. формирование входного сигнала каждой страты на основании выходного сигнала предыдущей страты, к стандартной операции умножения матриц. Показано, что предложенная модель допускает распараллеливание процесса имитации передачи сигналов от элементов каждой страты элементам последующей страты, что предоставляет возможность при использовании многопроцессорных компьютеров значительно ускорить процесс имитации. Применение предложенной модели сопряжения позволяет при проведении компьютерных экспериментов ввести необходимые изменения в матрицы сопряжения смежных страт в соответствии с конкурирующими вариантами структур исследуемой системы в процессе экспериментов, без изменения базовой имитационной программы.

Ключевые слова:

Страта, стратифицированный, контакт, имитация, эксперимент, сопряжение, структура, канал.

Key words:

Strata, stratified, contact, simulation, experiment, link, structure, channel.

Одной из основных проблем, возникающих при программной реализации компьютерных стратифицированных моделей сложных технологических систем со многими состояниями [1], ориентированных на исследование эффективности их функционирования с учетом надежности элементов, является разработка процедуры имитации сопряжения элементов смежных страт в системе, позволяющей обеспечить удобство и простоту проведения компьютерных экспериментов и уменьшить при этом объем перепрограммирования.

Суть этой проблемы заключается в том, что при рассмотрении на компьютерной модели конкурирующих вариантов структуры исследуемой системы возникает необходимость в модификации исходной (базовой) имитационной программы, обусловленной изменением структуры связей между элементами смежных страт.

В настоящей работе предлагается компьютерная модель сопряжения элементов смежных страт в строго-иерархической стратифицированной системе (СИСС) [1], позволяющая успешно решить указанную выше проблему.

Предлагаемая модель базируется на математической модели сопряжения элементов в СИСС [1, 2],

рассматривающей взаимодействие между элементами в рамках механизма обмена сигналами [3, 4], который включает следующие составляющие:

- 1) процесс формирования выходного сигнала элементом, выдающим сигнал;
- 2) определение адреса передачи для каждой характеристики выходного сигнала;
- 3) прохождение сигналов по каналам связи и компоновка (формирование) входных сигналов элементов;
- 4) функционирование элемента, принимающего входной сигнал.

Первая и четвертая составляющие не рассматриваются в рамках модели взаимодействия, поскольку относятся к построению моделей функционирования элементов системы.

Третья составляющая механизма обмена сигналами связана с прохождением сигналов через реальные (неидеальные) каналы связи, формально рассматриваемые как самостоятельные элементы системы, функционирование которых сводится к соответствующим задержкам и искажениям сигналов. В этом случае фиктивные каналы, соединяющие элементы, передают сигналы мгновенно и без искажений, т. е. формально являются идеальными.

Адресация характеристик выходных сигналов и их компоновка во входные сигналы элементов осуществляется схемой сопряжения, формальное описание которой опирается на следующие предположения, вытекающие из наблюдений над формализованными в виде СИСС реальными сложными системами.

1. Взаимное влияние элементов внутри СИСС, а также взаимодействие между СИСС и внешней средой реализуется только посредством обмена сигналами.
2. Входной сигнал $x^{\mu}(t) \in X^{\mu}$ (X^{μ} – множество входных сигналов страты S^{μ}), поступающий к страте S^{μ} в момент времени t , можно рассматривать как упорядоченную совокупность сигналов $x_i^{\mu}(t)$, $i \in I^{\mu} = \{1, 2, \dots, p_{\mu}\}$, одновременно поступающих на входы ее элементов S_i^{μ} , $i \in I^{\mu}$:

$$x^{\mu}(t) = (x_1^{\mu}(t), x_2^{\mu}(t), \dots, x_{p_{\mu}}^{\mu}(t)).$$

В свою очередь, входной сигнал $x_i^{\mu}(t)$, поступающий к элементу S_i^{μ} в момент времени t , можно представить в виде упорядоченной совокупности элементарных сигналов $x_{n_i}^{\mu}(t)$, $n \in N_i^{\mu} = \{1, 2, \dots, n_i^{\mu}\}$, одновременно поступающих на его вход:

$$x_i^{\mu}(t) = (x_{i,1}^{\mu}(t), x_{i,2}^{\mu}(t), \dots, x_{i,n_i}^{\mu}(t)).$$

Аналогично выходной сигнал $y^{\mu}(t) \in Y^{\mu}$ (Y^{μ} – множество выходных сигналов страты S^{μ}), выдаваемый стратой S^{μ} в момент времени t , можно рассматривать как упорядоченную совокупность сигналов $y_i^{\mu}(t)$, $i \in I^{\mu}$, одновременно выдаваемых элементами страты S^{μ} , а выходной сигнал $y_i^{\mu}(t)$ элемента S_i^{μ} – как упорядоченную совокупность элементарных сигналов $y_{l_i}^{\mu}(t)$, $l \in L_i^{\mu} = \{1, 2, \dots, l_i^{\mu}\}$, одновременно выдаваемых элементом S_i^{μ} .

Предположения 1 и 2 основываются на том, что взаимодействие элементов в процессе функционирования реальной системы рассматриваются как результат совокупности воздействий (сигналов) каждого элемента на другие элементы. Сигнал представляет собой воздействие, представленное набором характеристик.

Для общности описания внешняя среда представлена в виде совокупности фиктивных страт S^0 и S^{k+1} , причем страта S^0 состоит из элементов S_i^0 , $i \in I^0 = \{1, 2, \dots, p_0\}$. Таким образом, описание взаимодействия СИСС с внешней средой включает лишь формальное описание структуры связей между стратой S^1 СИСС и фиктивной стратой S^0 . Сигнал $y^0(t) \in Y^0$ (Y^0 – множество выходных сигналов внешней среды), поступающий в СИСС из внешней среды, является выходным сигналом страты S^0 и представляет собой упорядоченную совокупность выходных элементарных сигналов $y_{i_l}^0 = y_i^0(t) \in Y_i^0$ элементов S_i^0 , $i \in I^0$.

3. Элементарные сигналы передаются в СИСС независимо друг от друга по элементарным каналам связи, причем каждый элементарный канал, подключенный к выходу элемента S_i^{μ} , способен передавать только элементарные сигналы, принадлежащие одному из множеств $Y_{i_n}^{\mu}$, $n \in N_i^{\mu}$.

Предположение 3 сформулировано на основе того, что для функционирования реальной системы существенно лишь наличие на входе каждого элемента в данный момент времени соответствующего набора характеристик, описывающих сигнал. Данное предположение допускает следующую интерпретацию.

Вход каждого элемента СИСС представляет собой упорядоченную совокупность элементарных входов или входных контактов. Множество входных контактов элемента S_i^{μ} обозначено K_i^{μ} . Каждый входной контакт $k_{i_n}^{\mu} \in K_i^{\mu}$ предназначен для приема только элементарных сигналов $x_{i_n}^{\mu} \in X_i^{\mu}$. Аналогично выход каждого элемента СИСС представляет собой упорядоченную совокупность выходных контактов. Каждый выходной контакт $c_{i_l}^{\mu} \in C_i^{\mu}$ (C_i^{μ} – множество выходных контактов элемента S_i^{μ}) элемента S_i^{μ} предназначен только для выдачи элементарных сигналов $y_{i_l}^{\mu} \in Y_i^{\mu}$.

Вход каждой страты S^{μ} представляет собой упорядоченную совокупность K^{μ} входных контактов всех элементов S_i^{μ} , $i \in I^{\mu}$ данной страты:

$$K^{\mu} = \bigcup_{i \in I^{\mu}} K_i^{\mu}.$$

Соответственно выход страты S^{μ} представляет собой упорядоченную совокупность C^{μ} выходных контактов всех элементов S_i^{μ} , $i \in I^{\mu}$:

$$C^{\mu} = \bigcup_{i \in I^{\mu}} C_i^{\mu}.$$

Элементарные сигналы, выдаваемые данным выходным контактом страты $S^{\mu-1}$, передаются некоторому входному контакту страты S^{μ} лишь в том случае, если эти контакты соединены между собой элементарным каналом связи.

4. К каждому входному контакту элемента или страты подключается не более одного элементарного канала связи; к каждому выходному контакту страты $S^{\mu-1}$ может быть подключено конечное число элементарных каналов при условии, что к входу одного и того же элемента страты S^{μ} подключается лишь один из этих каналов. Следовательно, число элементарных каналов, подключенных к любому выходному контакту страты $S^{\mu-1}$, не может превышать числа элементов страты S^{μ} , а число выходных контактов страты $S^{\mu-1}$ не может быть больше числа входных контактов страты S^{μ} .

Данное предположение сформулировано с целью исключения неоднозначности входного сигнала за счет возможного появления на его входе в данный момент времени нескольких (несовпадающих) сигналов, поступающих из разных источников.

5. Элементы страты S^{μ} могут принять только сигналы, выдаваемые элементами страты $S^{\mu-1}$.

Предположение 5 вытекает из строго-иерархической конфигурации реальных систем, формализованных в виде СИСС.

Предположения 4 и 5 следует рассматривать как ограничение на структуру сети элементарных каналов связи в СИСС.

6. Сигналы передаются по элементарным каналам связи мгновенно и без искажений.

Данное предположение вытекает из сути третьей составляющей механизма обмена сигналами, допускающей рассмотрение реального канала связи как совокупности самостоятельного элемента системы, функционирование которой сводится к соответствующим задержкам и искажениям сигналов, и фиктивного (идеализированного) канала, передающего сигналы мгновенно и без искажений.

Необходимо заметить, что аналогичные предположения лежат в основе математической модели сопряжения элементов в сложной системе, разработанной Н.П. Бусленко [3], широкое практическое применение которой свидетельствует об ее адекватности исследуемым системам.

Математическая модель сопряжения любых двух элементов $S_i^\mu \in S^\mu$ и $S_j^{\mu-1} \in S^{\mu-1}$ представляет собой пару множеств K_i^μ , $C_j^{\mu-1}$ и однозначный оператор R_{ij}^μ , реализующий отображение

$$c_{ji}^{\mu-1} = R_{ij}^\mu(k_m^\mu), \quad l \in I_j^{\mu-1}, \quad n \in N_i^\mu.$$

Оператор сопряжения R_{ij}^μ данному входному контакту $k_m^\mu \in K_i^\mu$ элемента S_i^μ страты S^μ ставит в соответствие единственный выходной контакт $c_{ji}^{\mu-1} \in C_j^{\mu-1}$ элемента $S_j^{\mu-1}$ страты $S^{\mu-1}$, связанный с ним элементарным каналом связи. Следовательно в область определения оператора R_{ij}^μ входят лишь те входные контакты элемента S_i^μ , которые связаны с выходными контактами элемента $S_j^{\mu-1}$ элементарными каналами связи.

Оператор R_{ij}^μ задается в виде бинарной матрицы A_{ij}^μ размера $(I_j^{\mu-1} \times n_i^\mu)$, столбцы и строки которой соответствуют входным и выходным контактам элементов S_i^μ и $S_j^{\mu-1}$.

Структура связей между каждым элементом S_i^μ и стратой $S^{\mu-1}$ описывается оператором сопряжения R_i^μ :

$$c_{jl}^{\mu-1} = R_i^\mu(k_m^\mu), \quad j \in I^{\mu-1}, \quad l \in I_i^{\mu-1}, \quad n \in N_i^\mu,$$

реализующим отображение (инъекцию) $K_i^\mu \rightarrow C^{\mu-1}$, ставящим в соответствие каждому входному контакту $k_m^\mu \in K_i^\mu$ элемента S_i^μ страты S^μ единственный выходной контакт $c_{jl}^{\mu-1} \in C^{\mu-1}$ страты $S^{\mu-1}$, соединенный с контактом k_m^μ элементарным каналом связи.

В отличие от оператора R_{ij}^μ , реализующий функцию $K_i^\mu \rightarrow C_j^{\mu-1}$ оператор R_i^μ всюду определен на множестве контактов элемента S_i^μ . Область значений оператора R_i^μ представляет собой совокупность всех тех выходных контактов страты $S^{\mu-1}$, которые соединены с входными контактами элемента S_i^μ .

Оператор R_i^μ задается бинарной матрицей $A_i^\mu = |A_{i1}^\mu, A_{i2}^\mu, \dots, A_{ip_n}^\mu|^T$ размера $\left(\sum_{j \in I^{\mu-1}} I_j^{\mu-1} \times n_i^\mu \right)$.

Для описания структуры связей между смежными стратами S^μ и $S^{\mu-1}$ введен оператор сопряжения R^μ :

$$c_{jl}^{\mu-1} = R^\mu(k_m^\mu), \quad i \in I^\mu, \quad j \in I^{\mu-1}, \quad l \in I_j^{\mu-1}, \quad n \in N_i^\mu,$$

реализующий отображение (сюръекцию) $K^\mu \rightarrow C^{\mu-1}$.

В силу предположения 5 область значений оператора R^μ совпадает с множеством выходных контактов $C^{\mu-1}$ страты $S^{\mu-1}$. Оператор R^μ задается матрицей $A^\mu = |A_1^\mu, A_2^\mu, \dots, A_{p_n}^\mu|$ размера $\left(\sum_{j \in I^{\mu-1}} I_j^{\mu-1} \times \sum_{i \in I^\mu} n_i^\mu \right)$.

Необходимо отметить, что, несмотря на громоздкость матрицы A^μ , она обладает тем преимуществом, по сравнению с более компактной таблицей сопряжения [3, 4], что позволяет применять методы теории матриц и теории графов при изучении структуры сопряжения в СИСС, а также существенно упрощает процедуру имитации сопряжения смежных страт.

Контактная модель сопряжения элементов в СИСС

Формально сопряжение любых смежных страт $S^{\mu-1}$ и S^μ , т. е. формирование входного сигнала $x^\mu(t)$ страты S^μ на основе выходного сигнала $y^{\mu-1}(t)$ страты $S^{\mu-1}$ с использованием модели сопряжения $\langle K^\mu, C^\mu, R^\mu \rangle$, можно описать с помощью фиктивной страты S^μ следующим образом.

Согласно принятым предположениям 2 и 5, входной сигнал любой страты формируется исключительно из выходных элементарных сигналов страты $S^{\mu-1}$. Следовательно, в силу предположения 6, каждому выходному сигналу $y^{\mu-1}(t) \in Y^{\mu-1}$ страты $S^{\mu-1}$ можно ставить в соответствие единственный,

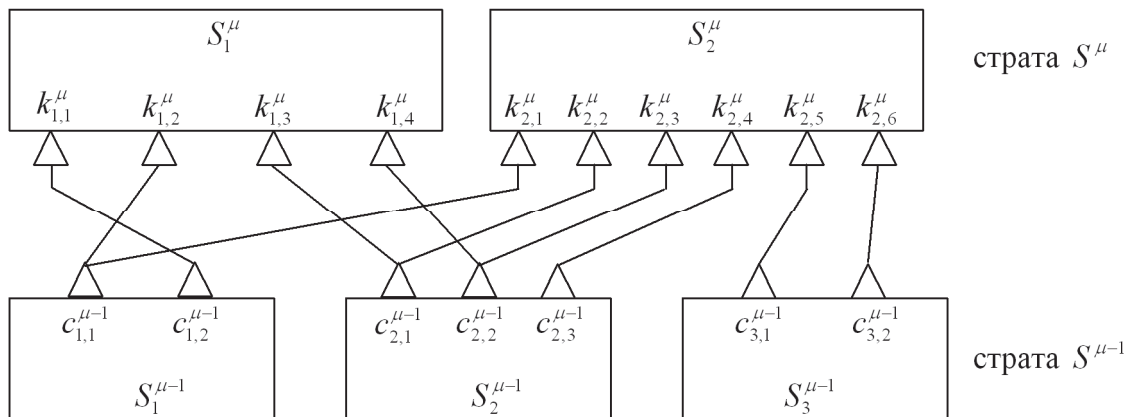


Рис. 1. Структура связей между элементами страт $S^{\mu-1}$ и S^μ

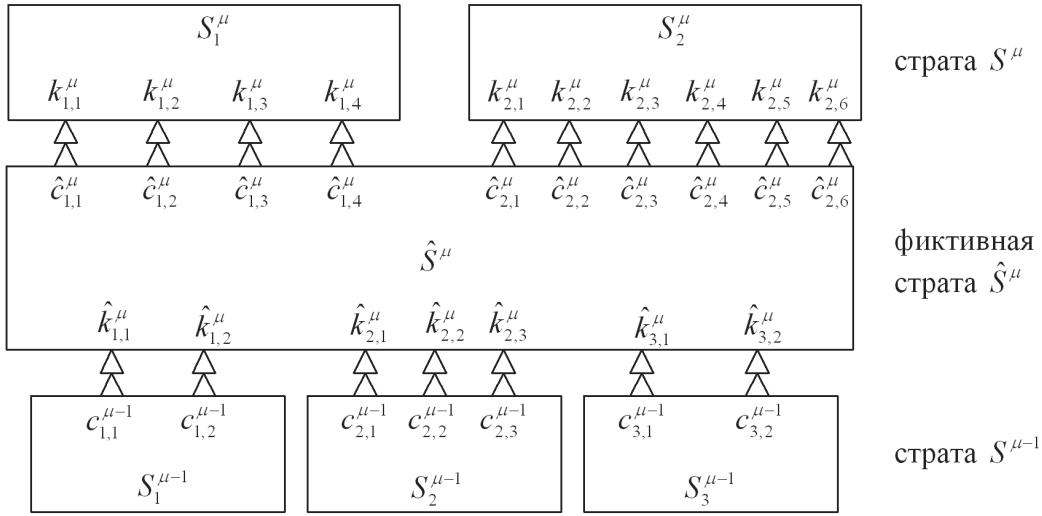


Рис. 2. Сопряжение страт $S^{\mu-1}$ и S^μ с помощью фиктивной страты \hat{S}^μ

вполне определенный входной сигнал $x^\mu(t) \in X^\mu$ страты S^μ , и наоборот. Тогда, с формальной точки зрения можно считать, что между любыми смежными стратами $S^{\mu-1}$ и S^μ расположена некоторая фиктивная страта \hat{S}^μ , преобразующая выходные сигналы страты $S^{\mu-1}$ в соответствующие им входные сигналы страты S^μ в соответствие с матрицей A^μ .

Введение фиктивных страт S^μ , $\mu \in I = \{1, 2, \dots, k\}$ позволяет из рассмотренных моделей сопряжения элементов и страт в СИСС перейти к эквивалентной, более удобной в теоретическом и прикладном отношениях контактной модели сопряжения, которая предполагает передачу и прием сигналов страт непосредственно через их контакты, без элементарных каналов связи.

В рамках механизма обмена сигналами каждая фиктивная страта \hat{S}^μ описывается множествами входных контактов $K^\mu = C^{\mu-1}$ и выходных контактов $S^\mu = K^\mu$.

Функционирование каждой фиктивной страты \hat{S}^μ , как временной статической системы без памяти [5], детерминировано и описывается оператором V^μ :

$$x^\mu(t) = V^\mu(y^{\mu-1}(t)),$$

реализующим однозначное отображение $Y^{\mu-1} \rightarrow X^\mu$.

С целью выяснения сути оператора V^μ и выявления его аналитического вида рассмотрим следующий пример.

Пусть структура связей между элементами страт S^μ и $S^{\mu-1}$ имеет конфигурацию, изображенную на рис. 1. Путем введения фиктивной страты \hat{S}^μ рассмотренную структуру представим в виде, показанном на рис. 2.

В силу предположения 3, каждый входной контакт $k_{in}^\mu \in K^\mu$ может принимать только входной элементарный сигнал $x_{in}^\mu(t) \in X_{in}^\mu$ страты S^μ , а каждый выходной контакт $c_{j\ell}^{\mu-1} \in C^{\mu-1}$ может выдавать только выходной элементарный сигнал $y_{j\ell}^{\mu-1}(t) \in Y_{j\ell}^{\mu-1}$ страты $S^{\mu-1}$. Следовательно, данный входной элементарный сигнал $x_{in}^\mu(t)$ представляет собой некоторый

выходной элементарный сигнал $y_{j\ell}^{\mu-1}(t)$, если контакт k_{in}^μ соединен с контактом $c_{j\ell}^{\mu-1}$ элементарным каналом, т. е. на пересечении соответствующего столбца и строки матрицы A^μ стоит единица. Учитывая это, с помощью матрицы A^μ для рассмотренной структуры сопряжения получим (t опущено):

$$\begin{aligned} x_{1,1}^\mu &= y_{1,2}^{\mu-1}; & x_{1,2}^\mu &= y_{1,1}^{\mu-1}; & x_{1,3}^\mu &= y_{2,1}^{\mu-1}; & x_{1,4}^\mu &= y_{2,2}^{\mu-1}; \\ x_{2,1}^\mu &= y_{1,1}^{\mu-1}; & x_{2,2}^\mu &= y_{2,1}^{\mu-1}; & x_{2,3}^\mu &= y_{2,2}^{\mu-1}; & x_{2,4}^\mu &= y_{2,3}^{\mu-1}; \\ x_{2,5}^\mu &= y_{3,1}^{\mu-1}; & x_{2,6}^\mu &= y_{3,2}^{\mu-1}. \end{aligned}$$

Нетрудно показать, что входной сигнал $x^\mu(t)$ страты S^μ представляет собой результат операции умножения выходного сигнала (вектор-строки) $y^{\mu-1}(t)$ страты $S^{\mu-1}$ на матрицу A^μ

$$\begin{aligned} (x_{1,1}^\mu, x_{1,2}^\mu, x_{1,3}^\mu, x_{1,4}^\mu, x_{2,1}^\mu, x_{2,2}^\mu, x_{2,3}^\mu, x_{2,4}^\mu, x_{2,5}^\mu, x_{2,6}^\mu) &= \\ = (y_{1,1}^{\mu-1}, y_{1,2}^{\mu-1}, y_{2,1}^{\mu-1}, y_{2,2}^{\mu-1}, y_{2,3}^{\mu-1}, y_{3,1}^{\mu-1}, y_{3,2}^{\mu-1}) \cdot A^\mu &= \\ = (y_{1,2}^{\mu-1}, y_{1,1}^{\mu-1}, y_{2,1}^{\mu-1}, y_{2,2}^{\mu-1}, y_{1,1}^{\mu-1}, y_{2,1}^{\mu-1}, y_{2,2}^{\mu-1}, y_{2,3}^{\mu-1}, y_{3,1}^{\mu-1}, y_{3,2}^{\mu-1}). \end{aligned}$$

Действительно, в результате умножения вектор-строки $y^{\mu-1}$ на матрицу A^μ получается вектор-строка x^μ , каждый элемент x_{in}^μ которой равен сумме произведений выходных элементарных сигналов $y_{j\ell}^{\mu-1}$ страты $S^{\mu-1}$ на соответствующие элементы столбца (i, n) матрицы A^μ .

В силу предположения 4, каждый столбец A^μ содержит только один единичный элемент, расположенный на пересечении данного столбца (i, n) и той строки (j, l) , соответствующий контакт $c_{j\ell}^{\mu-1}$ которой соединен с контактом k_{in}^μ элементарным каналом связи. Следовательно, каждый элемент x_{in}^μ вектор-строки x^μ равен тому элементу $y_{j\ell}^{\mu-1}$ вектор-строки $y^{\mu-1}$, который при вычислении x_{in}^μ умножается на единичный элемент столбца (i, n) (остальные элементы вектор-строки $y^{\mu-1}$ умножаются на нуль).

Таким образом, установлено, что оператор V^μ , ставящий в соответствие каждому выходному сигналу $y^{\mu-1}(t) \in Y^{\mu-1}$ страты $S^{\mu-1}$ входной сигнал $x^\mu(t) \in X^\mu$

$$x_{1,4}^\mu = y_{2,2}^{\mu-1}$$

$S^{\mu-1} \backslash S^\mu$	$k_{1,1}^\mu$	$k_{1,2}^\mu$	$k_{1,3}^\mu$	$k_{1,4}^\mu$	$k_{2,1}^\mu$	$k_{2,2}^\mu$	$k_{2,3}^\mu$	$k_{2,4}^\mu$	$k_{2,5}^\mu$	$k_{2,6}^\mu$
$c_{1,1}^{\mu-1}$		1			1					
$c_{1,2}^{\mu-1}$	1									
$c_{2,1}^{\mu-1}$			1			1				
$c_{2,2}^{\mu-1}$				1			1			
$c_{2,3}^{\mu-1}$								1		
$c_{3,1}^{\mu-1}$									1	
$c_{3,2}^{\mu-1}$										1

Рис. 3. Матрица A^μ сопряжения страт $S^{\mu-1}$ и S^μ

страты S^μ , реализует операцию умножения вектор-строки $y^{\mu-1}(t)$ на матрицу A^μ :

$$\begin{aligned} x^\mu(t) &= y^{\mu-1}(t) \cdot A^\mu = \\ &= (y_1^{\mu-1}(t), y_2^{\mu-1}(t), \dots, y_{p_{\mu-1}}^{\mu-1}(t)) \cdot A^\mu = \\ &= \begin{pmatrix} y_{1,1}^{\mu-1}(t), \dots, y_{1,l_1}^{\mu-1}(t), y_{2,1}^{\mu-1}(t), \dots, y_{2,l_2}^{\mu-1}(t), \dots, \\ y_{p_{\mu-1},1}^{\mu-1}(t), \dots, y_{p_{\mu-1},l_{p_{\mu-1}}}^{\mu-1}(t) \end{pmatrix} \cdot A^\mu. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом, в силу принятых предположений о структуре сети каналов связи в СИСС, вектор-строка $y^{\mu-1}(t)$ и матрица A^μ всегда согласуются

по форме ($y^{\mu-1}(t)$ имеет размер $\left(1 \times \sum_{j \in I^{\mu-1}} l_j^{\mu-1}\right)$, а ма-

трица $A^\mu - \left(\sum_{j \in I^{\mu-1}} l_j^{\mu-1}\right) \times \left(\sum_{i \in I^\mu} n_i^\mu\right)$.

Одно из привлекательных с практической точки зрения свойств фиктивных страт S^μ заключается в том, что каждый оператор V_i^μ можно представить в виде совокупности независимых друг от друга операторов V_i^μ , $i \in I^\mu$, каждый из которых реализует отображение $x_i^\mu = V_i^\mu(y^{\mu-1}(t))$.

Для определения вида каждого оператора V_i^μ представим матрицу A^μ через блоки V_i^μ , $i \in I^\mu$ и подставим в (1):

$$\begin{aligned} x^\mu(t) &= y^{\mu-1}(t) [A_1^\mu, A_2^\mu, \dots, A_{p_\mu}^\mu] = \\ &= [y^{\mu-1}(t) \cdot A_1^\mu : y^{\mu-1}(t) \cdot A_2^\mu : \dots : y^{\mu-1}(t) \cdot A_{p_\mu}^\mu]. \end{aligned} \quad (2)$$

С другой стороны, в силу предположения 2, имеем:

$$x^\mu(t) = (x_1^\mu(t), x_2^\mu(t), \dots, x_{p_\mu}^\mu(t)). \quad (3)$$

При сопоставлении соотношений (2) и (3) становится очевидным, что каждый оператор V_i^μ реализует операцию умножения выходного сигнала (вектор-строки) $y^{\mu-1}(t)$ страты $S^{\mu-1}$ на соответствующую матрицу A_i^μ :

$$x_i^\mu(t) = y_i^{\mu-1}(t) \cdot A_i^\mu.$$

То обстоятельство, что каждый оператор V_i^μ допускает декомпозицию на независимые друг от друга операторы V_i^μ , $i \in I^\mu$, предоставляет возможность распараллеливать процесс имитации передачи сигналов от любой страты $S^{\mu-1}$ к страте S^μ .

Таким образом, процедура имитации сопряжения элементов любых смежных страт S^μ и $S^{\mu-1}$ в СИСС сводится к реализации стандартной операции умножения матриц, допускающей распараллеливание процесса имитации сопряжения.

Выводы

Разработана имитационная модель сопряжения элементов в СИСС, позволяющая свести процедуру имитации сопряжения элементов ее смежных страт, т. е. формирование входных сигналов элементов μ -й страты на основе выходных сигналов элементов $(\mu-1)$ -й страты, к реализации стандартной операции умножения матриц, допускающей распараллеливание процесса имитации сопряжения. Применение разработанной модели дает возможность при проведении компьютерных экспериментов ввести необходимые изменения в матрицы сопряжения смежных страт в соответствии с конкурирующими вариантами структур исследуемой системы в ходе экспериментов, без изменения базовой имитационной программы, а также существенно ускорить моделирование при использовании многопроцессорных компьютеров.

Предложенная модель сопряжения использована при компьютерном моделировании процесса функционирования технологической системы измельчения руды Зангезурского медно-молибденового комбината (Армения) с учетом надежности оборудования. Результаты проведенных имитационных экспериментов свидетельствуют об адекватности разработанной модели сопряжения исследуемой технологической системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баласанян С.Ш. Стратифицированная модель для оценки и анализа эффективности функционирования сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 25–30.
2. Баласанян С.Ш. Метод стратифицированной формализации сложных систем с учетом надежности // Вестник ГИУА. Серия «Моделирование, оптимизация, управление». – 2007. – Т. 1. – Вып. 10. – С. 22–32.
3. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. 2-е изд. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
4. Сирота А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. – М.: Техносфера, 2006. – 280 с.
5. Месарович М., Такахара И. Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978. – 311 с.

Поступила 19.06.2012 г.

УДК 519.872

МНОГОМОДАЛЬНОСТЬ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ПОЛУМАРКОВСКОГО ПОТОКА В УСЛОВИИ ПРЕДЕЛЬНО РЕДКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЕГО СОСТОЯНИЙ

А.А. Назаров¹, В.З. Ямпольский², М.А. Яценко³

¹Томский государственный университет

²Томский политехнический университет

³ООО «ИНКОМ»

E-mail: yvz@tpu.ru

Построена математическая модель телекоммуникационного потока в виде высокоинтенсивного полумарковского потока в условии предельно редких изменений его состояний, который обладает свойством многомодальности распределения вероятностей числа его событий, наступивших за единицу времени. Показана линейная зависимость его характеристик от времени наблюдения за потоком.

Ключевые слова:

Телекоммуникационные потоки, высокоинтенсивные полумарковские потоки, предельно редкие изменения состояний потока, многомодальность распределения.

Key words:

Telecommunication streams, high-intensity semi-Markov streams, extremely rare stream state changes, multimodal distributions.

Введение

Статистические исследования реальных телекоммуникационных потоков показывают, что некоторые из них обладают свойством многомодальности гистограмм числа их событий, наступивших за единицу времени. Применение методов проверки статистических гипотез не отклоняют гипотезу о том, что теоретическое распределение генеральной совокупности является смесью нормальных распределений.

Ставится задача построения математической модели таких потоков, обладающих свойством многомодальности распределений числа событий, наступивших в этих потоках за единицу времени. В работе показано, что этим свойством обладает высокоинтенсивный полумарковский поток в условии предельно редких изменений его состояний.

Высокоинтенсивный полумарковский поток в условии предельно редких изменений его состояний

Пусть задана диагональная матрица $A(x)$ размерности L с элементами $A_l(x)$, $l=\overline{1, L}$ и стохастическая матрица

$$P = I + \delta Q \quad (1)$$

размерности $L \times L$ с элементами

$$P_{l_1 l_2} = \delta_{l_1 l_2} + \delta q_{l_1 l_2},$$

где I – единичная матрица; $\delta_{l_1 l_2}$ – символ Кронекера; δ – некоторый малый параметр. Также задан положительный большой параметр N .

Рассмотрим полумарковский процесс $l(t)$, принимающий значения $l(t)=l=\overline{1, L}$ с условно независимыми компонентами [1], полумарковская матрица которого факторизуется и равна произведению

$$A(Nx)P = A(Nx)(I + \delta Q). \quad (2)$$

Обрабатывающий его процесс $n(t)$ определяет число событий, наступивших за время t в полумарковском потоке (SM-потоке), заданным полумарковской матрицей (2).

Полумарковский процесс $l(t)$ будем называть процессом, управляющим полумарковским потоком, а значения $l(t)=l$ этого процесса будем называть состояниями SM-потока.

В состоянии l длина ξ_l интервала между моментами наступления событий рассматриваемого потока определяется функцией распределения

$$P\{\xi_l < x\} = A_l(Nx).$$

Наличие здесь большого параметра N оправдывает название – высокоинтенсивный поток. Наличие малого параметра δ , который определяет в (2) вероятности смены состояний потока, оправдывает применение названия условия: условие предельно редких изменений состояний SM-потока.

Ниже будет выполнено исследование рассматриваемого высокоинтенсивного полумарковского потока в условии предельно редких изменений его состояний, применяя подходы, развитые в работах [2] и [3].

Уравнение Колмогорова

Применяя метод дополнительных компонент, рассмотрим трехмерный марковский случайный процесс $\{l(t), z(t), n(t)\}$, где $z(t)$ – длина интервала от момента t до момента наступления следующего события в рассматриваемом потоке. Компоненты $l(t)$ и $n(t)$ этого процесса определены выше. Здесь $l(t)$ – полумарковский процесс, управляющий рассматриваемым потоком, а $n(t)$ – число его событий, наступивших за время t .

Обозначая распределение вероятностей

$$P\left\{l(t) = l, z(t) < \frac{z}{N}, n(t) = n\right\} = P(l, z, n, t),$$

запишем равенство

$$\begin{aligned} P\{l, z - N\Delta t, n, t + \Delta t\} &= \\ &= P(l, z, n, t) - P(l, N\Delta t, n, t) + \\ &+ \sum_{i=1}^L P(l_i, N\Delta t, n-1, t) P_{i,l} A_i(z) + o(\Delta t), \end{aligned}$$

из которого получим уравнение Колмогорова

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(l, n, t)}{\partial t} &= N \frac{\partial P(l, z, n, t)}{\partial z} - N \frac{\partial P(l, 0, n, t)}{\partial z} + \\ &+ \sum_{i=1}^L N \frac{\partial P(l, 0, n-1, t)}{\partial z} P_{i,l} A_i(z), \end{aligned}$$

где применяется обозначение

$$\left. \frac{\partial P(l, 0, n, t)}{\partial z} = \frac{\partial P(l, z, n, t)}{\partial z} \right|_{z=0}.$$

Определяя вектор строку

$$\mathbf{P}(z, n, t) = \{P(1, z, n, t), P(2, z, n, t), \dots, P(L, z, n, t)\},$$

последнее уравнение перепишем в матричном виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \frac{\partial \mathbf{P}(z, n, t)}{\partial t} &= \frac{\partial \mathbf{P}(z, n, t)}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{P}(0, n, t)}{\partial z} + \\ &+ \frac{\partial \mathbf{P}(0, n-1, t)}{\partial z} (\mathbf{I} + \delta \mathbf{Q}) \mathbf{A}(z). \end{aligned} \quad (3)$$

Обозначая векторную характеристическую функцию

$$\mathbf{H}(z, u, t) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{jun} \mathbf{P}(z, n, t),$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, и применяя уравнение (3), для функции $\mathbf{H}(z, u, t)$ запишем равенство

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \frac{\partial \mathbf{H}(z, u, t)}{\partial t} &= \frac{\partial \mathbf{H}(z, u, t)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{H}(0, u, t)}{\partial z} \times \\ &\times (e^{ju} \mathbf{A}(z) - \mathbf{I} + \delta e^{ju} \mathbf{Q} \mathbf{A}(z)). \end{aligned} \quad (4)$$

Рассматривая стационарный SM-поток, будем полагать, что выполнено условие

$$\mathbf{H}(z, u, 0) = \mathbf{R}(z). \quad (5)$$

Функцию $\mathbf{R}(z)$ найдем из уравнения (4), применяя равенство

$$\mathbf{H}(z, u, 0) = \mathbf{R}(z) = \mathbf{H}(z, 0, t), \quad (6)$$

в котором вектор функция $\mathbf{R}(z)$ является стационарным распределением вероятностей

$$\mathbf{R}(z) = P\left\{l(t) = l, z(t) < \frac{z}{N}\right\}$$

двумерного случайного процесса $\{l(t), z(t)\}$.

Подставляя (6) в (4), для распределения $\mathbf{R}(z)$ получим уравнение

$$\mathbf{R}'(z) = \mathbf{R}'(0) \{\mathbf{I} - \mathbf{A}(z) - \delta \mathbf{Q} \mathbf{A}(z)\}, \quad (7)$$

решение $\mathbf{R}(z)$ которого, удовлетворяющее краевому условию $\mathbf{R}(0) = 0$, имеет вид

$$\mathbf{R}(z) = \int_0^z \mathbf{R}'(0) \{\mathbf{I} - \mathbf{A}(x) - \delta \mathbf{Q} \mathbf{A}(x)\} dx. \quad (8)$$

Так как существует маргинальное распределение $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\infty)$ случайного процесса $l(t)$, то в (7) при $z = \infty$ выполняется равенство

$$\mathbf{R}'(0) \mathbf{Q} = 0, \quad (9)$$

а (7) можно переписать в виде

$$\mathbf{R}'(z) = \mathbf{R}'(0) \{\mathbf{I} - \mathbf{A}(z)\}. \quad (10)$$

В (9) матрица \mathbf{Q} , в силу равенства (1), обладает всеми свойствами матрицы инфинитезимальных характеристик некоторой эргодической цепи Маркова с непрерывным временем, поэтому решение $\mathbf{R}'(0)$ уравнения (9) имеет вид

$$\mathbf{R}'(0) = \mathbf{C} \mathbf{r}, \quad (11)$$

где \mathbf{r} – стационарное распределение вероятностей значений цепи Маркова, определяемой матрицей \mathbf{Q} , то есть распределение \mathbf{r} является решением системы линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{r} \mathbf{Q} = 0, \mathbf{r} \mathbf{E} = 1, \quad (12)$$

где \mathbf{E} – единичный вектор столбец.

Значение произвольной постоянной \mathbf{C} в (11) найдем из следующего условия нормировки

$$\begin{aligned} 1 &= \mathbf{R} \mathbf{E} = \mathbf{R}(\infty) \mathbf{E} = \\ &= \int_0^{\infty} \mathbf{R}'(0) \{\mathbf{I} - \mathbf{A}(x) - \delta \mathbf{Q} \mathbf{A}(x)\} dx \mathbf{E} = \\ &= \mathbf{C} \int_0^{\infty} \mathbf{r} \{\mathbf{I} - \mathbf{A}(x) - \delta \mathbf{Q} \mathbf{A}(x)\} dx \mathbf{E} = \\ &= \mathbf{C} \mathbf{r} \int_0^{\infty} \{\mathbf{I} - \mathbf{A}(x)\} dx \mathbf{E} = \mathbf{C} \mathbf{r} \mathbf{a} \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (13)$$

где \mathbf{a} – диагональная матрица математических ожиданий, определяемых функциями распределе-

ния $A(x)$, которые являются диагональными элементами матрицы $\mathbf{A}(x)$.

Из (13) следует, что выполняется равенство

$$C = \frac{1}{\mathbf{r}\mathbf{a}\mathbf{E}} = \frac{1}{\sum_{l=1}^L r_l a_l}, \quad (14)$$

где r_l – элементы вектора \mathbf{r} .

Подставляя (11) в (8), для $\mathbf{R}(z)$ получим равенство

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(z) &= \int_0^z \mathbf{R}'(0) \{ \mathbf{I} - \mathbf{A}(x) - \delta \mathbf{Q}\mathbf{A}(x) \} dx = \\ &= C \int_0^z \mathbf{r} \{ \mathbf{I} - \mathbf{A}(x) \} dx, \end{aligned} \quad (15)$$

в котором вектор \mathbf{r} является решением системы (12), а постоянная C определяется равенством (14).

В частности, из (15) при $z \rightarrow \infty$ следует равенство

$$R(l) = R(l, \infty) = \frac{\partial R(l, 0)}{\partial z} a_l, \quad (16)$$

которое, обозначив $\lambda_l = \frac{1}{a_l}$, запишем в виде

$$\frac{\partial R(l, 0)}{\partial z} = \lambda_l R(l). \quad (17)$$

Таким образом, векторная характеристическая функция $\mathbf{H}(z, u, t)$, в силу равенств (4) и (6), является решением задачи Коши

$$\begin{cases} \frac{1}{N} \frac{\partial \mathbf{H}(z, u, t)}{\partial t} = \\ = \frac{\partial \mathbf{H}(z, u, t)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{H}(0, u, t)}{\partial z} \times \\ \times (e^{ju} \mathbf{A}(z) - \mathbf{I} + \delta e^{ju} \mathbf{Q}\mathbf{A}(z)), \\ \mathbf{H}(z, u, 0) = \mathbf{R}(z), \end{cases} \quad (18)$$

где векторная функция $\mathbf{R}(z)$ определяется равенством (15).

Отметим, что функция $\mathbf{R}(z)$, определяющая начальное условие в задаче (18), не зависит от значения параметра δ , но решение $\mathbf{H}(z, u, t)$ задачи (18) зависит от значений этого параметра, поэтому это решение будем обозначать $\mathbf{H}(z, u, t, \delta)$, а задачу (18) перепишем в виде

$$\begin{cases} \frac{1}{N} \frac{\partial \mathbf{H}(z, u, t, \delta)}{\partial t} = \\ = \frac{\partial \mathbf{H}(z, u, t, \delta)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{H}(0, u, t, \delta)}{\partial z} \times \\ \times (e^{ju} \mathbf{A}(z) - \mathbf{I} + \delta e^{ju} \mathbf{Q}\mathbf{A}(z)), \\ \mathbf{H}(z, u, 0, \delta) = \mathbf{R}(z). \end{cases} \quad (19)$$

Решение этой задачи выполним применением методов асимптотического анализа в условии предельно редких изменений состояний ($\delta \rightarrow 0$) [2] и неограниченно возрастающей интенсивности ($N \rightarrow \infty$) [3].

Метод асимптотического анализа

в условии предельно редких изменений состояний

Обозначив

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \mathbf{H}(z, u, t, \delta) = \mathbf{H}(z, u, t),$$

в (19) выполним указанный предельный переход, тогда для векторной функции $\mathbf{H}(z, u, t)$ получим задачу Коши

$$\begin{cases} \frac{1}{N} \frac{\partial \mathbf{H}(z, u, t)}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{H}(z, u, t)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{H}(0, u, t)}{\partial z} (e^{ju} \mathbf{A}(z) - \mathbf{I}), \\ \mathbf{H}(z, u, 0) = \mathbf{R}(z), \end{cases}$$

для системы L дифференциальных уравнений, которая в силу диагональности матриц $\mathbf{A}(x)$ и \mathbf{I} распадается на L независимых задач Коши.

$$\begin{cases} \frac{1}{N} \frac{\partial H(l, z, u, t)}{\partial t} = \\ = \frac{\partial H(l, z, u, t)}{\partial z} + \frac{\partial H(l, 0, u, t)}{\partial z} \times \\ \times (e^{ju} A_l(z) - 1), \\ H(l, z, u, 0) = R(l, z), \end{cases} \quad (20)$$

для элементов $H(l, z, u, t)$ векторной функции $\mathbf{H}(z, u, t)$.

Маргинальное распределение вероятностей числа событий, наступивших за время t в рассматриваемом потоке, определяется характеристической функцией.

$$h(u, t) = M e^{ju n(t)} = \sum_{n=0}^{\infty} e^{ju n} P\{n(t) = n\},$$

которую, при достаточно малых значений параметра δ , можно аппроксимировать решением $H(l, z, u, t)$ задачи (20)

$$h(u, t) = \sum_{l=1}^L H(l, \infty, u, t). \quad (21)$$

Решение задачи (20) найдем, применяя метод асимптотического анализа в условии неограниченно растущей интенсивности в предельном условии $N \rightarrow \infty$.

Метод асимптотического анализа в условии неограниченно растущей интенсивности

В задаче (20) выполним замену

$$H(l, z, u, t) = H_2(l, z, u, t) \exp\{ju \lambda_l N t\}, \quad (22)$$

где, как указано выше,

$$\lambda_l = \frac{1}{a_l} = 1 \int_0^{\infty} (1 - A_l(z)) dz.$$

Тогда для функции $H_2(l, z, u, t)$ получим задачу

$$\begin{cases} \frac{1}{N} \frac{\partial H_2(l, z, u, t)}{\partial t} + H_2(l, z, u, t) ju \lambda_l = \\ = \frac{\partial H_2(l, z, u, t)}{\partial z} + \frac{\partial H_2(l, 0, u, t)}{\partial z} \times \\ \times (e^{ju} A_l(z) - 1), \\ H(l, z, u, 0) = R(l, z). \end{cases} \quad (23)$$

В полученной задаче (23), обозначив $\varepsilon^2 = 1/N$, выполним замены

$$u = \varepsilon w, \quad H_2(l, z, u, t) = F(l, z, w, t, \varepsilon), \quad (24)$$

для $F(l, z, w, t, \varepsilon)$ запишем задачу

$$\begin{cases} \varepsilon^2 \frac{\partial F(l, z, w, t, \varepsilon)}{\partial t} + F(l, z, w, t, \varepsilon) j \varepsilon w \lambda_l = \\ = \frac{\partial F(l, z, w, t, \varepsilon)}{\partial z} + \frac{\partial F(l, 0, w, t, \varepsilon)}{\partial z} \times \\ \times (e^{j \varepsilon w} A_l(z) - 1), \\ F(l, z, w, 0, \varepsilon) = R(l, z). \end{cases} \quad (25)$$

Можно доказать следующее утверждение.

Теорема. *Предельное при $\varepsilon \rightarrow 0$ значение $F(l, z, w, t)$ решения $F(l, z, w, t, \varepsilon)$ задачи (25) имеет вид произведения*

$$F(l, z, w, t) = \Phi(l, w, t) R(l, z), \quad (26)$$

в котором функция $\Phi(l, w, t)$ имеет вид

$$\Phi(l, w, t) = \exp \left\{ \frac{(jw)^2}{2} (\lambda_l + \kappa_l) t \right\}, \quad (27)$$

где $\kappa_l = \lambda_l^3 (\sigma_l^2 - a_l^2)$. (28)

Здесь λ_l – величина, обратная к среднему a_l ; σ_l^2 – дисперсия, определяемая функцией распределения $A_l(z)$.

Доказательство. Доказательство этой теоремы выполним в три этапа.

Этап 1. Обозначив

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} F(l, z, w, t, \varepsilon) = F(l, z, w, t),$$

в задаче (25) выполним указанный предельный переход, для функции $F(l, z, w, t)$ получим задачу

$$\begin{cases} \frac{\partial F(l, z, w, t)}{\partial z} + \frac{\partial F(l, 0, w, t)}{\partial z} (A_l(z) - 1) = 0, \\ F(l, z, w, 0) = R(l, z), \end{cases} \quad (29)$$

совпадающую с ее матричной формой (10), поэтому решение $F(l, z, w, t)$ задачи (29) имеет вид произведения (26), а функция $\Phi(l, w, t)$ удовлетворяет начальному условию

$$\Phi(l, w, 0) = 1.$$

Этап 2. Уравнение задачи (25) перепишем в виде

$$O(\varepsilon^2) + F(l, z, w, t, \varepsilon) j \varepsilon w \lambda_l = \frac{\partial F(l, z, w, t, \varepsilon)}{\partial z} + \frac{\partial F(l, 0, w, t, \varepsilon)}{\partial z} (A_l(z) - 1 + j \varepsilon w A_l(z)), \quad (30)$$

а его решение $F(l, z, w, t, \varepsilon)$ запишем в виде разложения

$$F(l, z, w, t, \varepsilon) = \Phi(l, w, t) \{R(l, z) + j \varepsilon w f(l, z)\} + O(\varepsilon^2), \quad (31)$$

подставляя которое в (30), получим равенство

$$\begin{aligned} O(\varepsilon^2) + R(l, z) j \varepsilon w \lambda_l &= \frac{\partial R(l, z)}{\partial z} + j \varepsilon w \frac{\partial f(l, z)}{\partial z} + \\ + \left\{ \frac{\partial R(l, 0)}{\partial z} + j \varepsilon w \frac{\partial f(l, 0)}{\partial z} \right\} &(A_l(z) - 1 + j \varepsilon w A_l(z)) = \\ = \frac{\partial R(l, z)}{\partial z} + j \varepsilon w \frac{\partial f(l, z)}{\partial z} + \frac{\partial R(l, 0)}{\partial z} &(A_l(z) - 1) + \\ + j \varepsilon w \frac{\partial f(l, 0)}{\partial z} (A_l(z) - 1) + j \varepsilon w \frac{\partial R(l, 0)}{\partial z} &A_l(z), \end{aligned}$$

которое, в силу равенств (10) и (17) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(l, z)}{\partial z} + \frac{\partial f(l, 0)}{\partial z} (A_l(z) - 1) &= \lambda_l R(l, z) - \\ - \frac{\partial R(l, 0)}{\partial z} A_l(z) &= \lambda_l (R(l, z) - R(l) A_l(z)). \end{aligned}$$

Интегрируя это равенство по z в интервале $[0, \infty)$, получим выражение

$$f(l, \infty) - \frac{\partial f(l, 0)}{\partial z} a_l = \lambda_l \int_0^\infty (R(l, z) - R(l) A_l(z)) dz,$$

которое перепишем в виде

$$\lambda_l f(l, \infty) - \frac{\partial f(l, 0)}{\partial z} = \lambda_l^2 \int_0^\infty (R(l, z) - R(l) A_l(z)) dz.$$

Применяя (15)–(17), нетрудно показать, что выполняется равенство

$$\lambda_l f(l, \infty) - \frac{\partial f(l, 0)}{\partial z} = \lambda_l^3 R(l) \frac{1}{2} (a_l^2 - \sigma_l^2), \quad (32)$$

где a_l и σ_l^2 – среднее и дисперсия, определяемые функцией распределения $A_l(z)$.

Этап 3. Обозначив

$$\lim_{z \rightarrow \infty} F(l, z, w, t, \varepsilon) = F(l, w, t, \varepsilon),$$

в уравнении задачи (25) выполним указанный предельный переход, для функции $F(l, w, t, \varepsilon)$ получим равенство

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 \frac{\partial F(l, w, t, \varepsilon)}{\partial t} + F(l, w, t, \varepsilon) j \varepsilon w \lambda_l &= \\ = \frac{\partial F(l, 0, w, t, \varepsilon)}{\partial z} &(e^{j \varepsilon w} - 1), \end{aligned}$$

в которое подставим разложение (31), запишем

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 \frac{\partial \Phi(l, w, t)}{\partial t} R(l) + \Phi(l, w, t) \times \\ \times \{R(l) + j \varepsilon w f(l, \infty)\} j \varepsilon w \lambda_l &= \\ = \Phi(l, w, t) \left\{ \frac{\partial R(l, 0)}{\partial z} + j \varepsilon w \frac{\partial f(l, 0)}{\partial z} \right\} \times \\ \times \left(j \varepsilon w + \frac{(j \varepsilon w)^2}{2} \right) + O(\varepsilon^3) &= \Phi(l, w, t) \times \\ \times \left\{ j \varepsilon w \frac{\partial R(l, 0)}{\partial z} + \right. & \\ \left. + (j \varepsilon w)^2 \frac{\partial f(l, 0)}{\partial z} + \frac{(j \varepsilon w)^2}{2} \frac{\partial R(l, 0)}{\partial z} \right\} &+ O(\varepsilon^3). \end{aligned}$$

В силу (17) это равенство перепишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(l, w, t)}{\partial t} R(l) &= \frac{(jw)^2}{2} \Phi(l, w, t) \times \\ \times \left\{ \lambda_l R(l) - 2 \left(\lambda_l f(l, \infty) - \frac{\partial f(l, 0)}{\partial z} \right) \right\}. \end{aligned}$$

Применяя здесь равенства (17) и (32), получим уравнение

$$\frac{\partial \Phi(l, w, t)}{\partial t} = \frac{(jw)^2}{2} \Phi(l, w, t) \{ \lambda_l + \lambda_l^3 (\sigma_l^2 - a_l^2) \},$$

относительно функции $\Phi(l, w, t)$.

Решение $\Phi(l, w, t)$ этого уравнения, удовлетворяющее начальному условию $\Phi(l, w, 0) = 1$, в силу обозначения (28), можно записать в виде

$$\Phi(l, w, t) = \exp \left\{ \frac{(jw)^2}{2} (\lambda_l + \kappa_l) t \right\},$$

совпадающем с (27). Теорема доказана.

Многомодальность распределения вероятностей числа событий, наступивших за единицу времени высокоинтенсивного полумарковского потока в условии предельно редких изменений его состояний

Применяя в (27) замену

$$w = \frac{u}{\varepsilon} = u\sqrt{N}$$

из (24), также равенство (26)

$$\begin{aligned} H_2(l, z, u, t) &= F(l, z, w, t) = \\ &= R(l, z) \exp \left\{ \frac{(ju)^2}{2} (\lambda_l + \kappa_l) Nt \right\} \end{aligned}$$

и замену (22), можно записать асимптотическое равенство

$$\begin{aligned} H_2(l, z, u, t) &= \\ &= R(l, z) \exp \left\{ ju\lambda_l Nt + \frac{(ju)^2}{2} (\lambda_l + \kappa_l) Nt \right\}. \end{aligned}$$

Для маргинальной характеристической функции $h(u, t)$ из (21) получим аппроксимацию

$$h(u, t) = \sum_{l=1}^L R(l) \exp \left\{ ju\lambda_l Nt + \frac{(ju)^2}{2} (\lambda_l + \kappa_l) Nt \right\} \quad (33)$$

распределения вероятностей числа событий, наступивших за времена t в высокоинтенсивном по-

лумарковском потоке в условии предельно редких изменений его состояний в виде смеси с весами $R(l)$ гауссовских распределений с параметрами $\lambda_l Nt$ и $(\lambda_l + \kappa_l) Nt$. Здесь κ_l определяется равенством (28) и распределение вероятностей $R(l)$, как следует из (15), имеет вид

$$R(l) = Cr_l a_l = r_l a_l / \sum_{l=1}^L r_l a_l,$$

где $r_l, l = \overline{1, L}$ является решением системы (12).

Отметим, что распределение вероятностей, определяемое равенством (33), при соответствующих значениях параметров является многомодальным с количеством локальных максимумов не более L . А его локальные параметры среднего и дисперсии линейно зависят от времени t наблюдения за рассматриваемым потоком.

Заключение

В работе выполнено исследование высокоинтенсивного полумарковского потока в условии предельно редких изменений его состояний. Показано, что распределение вероятностей числа его событий, наступивших за время t является взвешенной, с весами $R(l)$, суммой гауссовских распределений с параметрами $\lambda_l Nt$ и $(\lambda_l + \kappa_l) Nt$, которые линейно зависят от времени t наблюдения за потоком, что позволяет такой поток рассматривать в качестве математической модели телекоммуникационных потоков с многомодальными гистограммами числа событий.

Можно показать, что аналогичные результаты имеют место и для других специальных [4], коррелированных [5] потоков, таких как ММРР, МАР, а так же их неординарных аналогов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королюк В.С. Стохастические модели систем. – Киев: Наукова думка, 1989. – 203 с.
2. Горбатенко А.Е. Исследование систем массового обслуживания с коррелированными потоками в специальных предельных условиях: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2010. – 156 с.
3. Лопухова С.В. Асимптотические и численные методы исследования специальных потоков однородных событий: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 167 с.

4. Гнеденко Б.В. Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. 4-е изд. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 400 с.
5. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. – Минск: БГУ, 2000. – 175 с.

Поступила 17.09.2012 г.

УДК 519.872

МЕТОД МОМЕНТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КРАТНЫХ ЗАЯВОК ПОТОКА МАРКОВСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

И.А. Синякова, С.П. Моисеева

Томский государственный университет
E-mail: irinka_asf@mail.ru; smoiseeva@mail.ru

Предлагается математическая модель параллельного обслуживания кратных заявок в виде системы массового обслуживания (СМО) с параллельно функционирующими блоками. Методом моментов найдены основные вероятностные характеристики двумерного процесса, характеризующего число заявок, находящихся на обслуживании.

Ключевые слова:

Параллельное обслуживание, кратные заявки, поток марковского восстановления, метод моментов.

Key words:

Parallel service, multiple demands, stream of Markov restoration, the method of moments.

В настоящее время внимание к теории массового обслуживания в значительной степени стимулировалось необходимостью применения результатов этой теории к важным практическим задачам, возникающим в связи с бурным развитием систем коммуникаций, возникновением информационно-вычислительных систем, появлением и усложнением разнообразных технологических систем, созданием автоматизированных систем управления.

Исследование систем массового обслуживания с групповым поступлением заявок и параллельным обслуживанием является одним из востребованных направлений теории массового обслуживания [1–2].

Исследованию однолинейных систем массового обслуживания с неординарными входящими потоками (пуассоновским и рекуррентным) посвящены работы П.П. Бочарова, А.В. Печинкина и других российских учёных [3–5], в которых рассматриваются системы массового обслуживания с марковским неординарным входящим потоком, несколькими типами заявок, обобщённой дисциплиной преимущественного разделения прибора заявками с минимальной обслуженной длиной, марковским обслуживанием и накопителем бесконечной ёмкости. Кроме того, в статье украинских учёных [6] предлагается исследование подобных систем с двумерным пуассоновским потоком, но предлагаемый авторами метод неприменим для исследования аналогичных систем с произвольным временем обслуживания или непуассоновским входящим потоком.

В настоящей работе предлагается математическая модель параллельного обслуживания кратных заявок в виде системы массового обслуживания с параллельно функционирующими блоками.

Рассмотрим систему массового обслуживания ($MR^{(2)}|M_2|\infty$) с входящим потоком кратных заявок и двумя блоками обслуживания, каждый из которых содержит неограниченное число приборов. На вход системы поступает поток Марковского восстановления двоек заявок, заданный наборо-

ром функций распределения длин интервалов $A_1(x), \dots, A_k(x)$ и матрицей \mathbf{P} – вложенной по моментам наступления событий цепи Маркова [7].

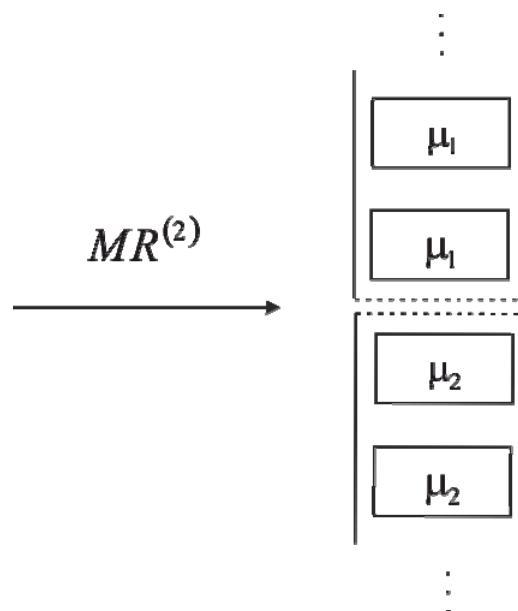


Рисунок. СМО $MR^{(2)}|M_2|\infty$ с параллельным обслуживанием кратных заявок

Продолжительности обслуживания различных заявок стохастически независимы, одинаково распределены в каждом блоке и имеют экспоненциальное распределение с параметрами μ_1 и μ_2 соответственно. Поступившая заявка занимает любой из свободных приборов, завершив обслуживание, заявка покидает систему. Ставится задача исследования двумерного процесса, характеризующего число заявок в каждом блоке.

Обозначим i_k – число заявок в k -м блоке обслуживания. Так как входящий поток непуассоновский, то двумерный процесс $\{i_1(t), i_2(t)\}$, немарковский, поэтому рассмотрим четырехмерный марковский процесс $\{k(t), z(t), i_1(t), i_2(t)\}$, который является марковским, где $z(t)$ – длина интервала от момента времени t до момента наступления очеред-

ного события во входящем MR потоке, а процесс $k(t)$ – вложенная по моментам наступления событий цепь Маркова.

Определим вероятности

$$P(k, z, i_1, i_2, t) = P \left\{ \begin{array}{l} k(t) = k, z(t) < z, i_1(t) = \\ = i_1, i_2(t) = i_2 \end{array} \right\}.$$

Для распределения $P(k, z, i_1, i_2, t)$ Δt -методом запишем равенства:

$$\begin{aligned} & P(k, z - \Delta t, i_1, i_2, t + \Delta t) = \\ & = (P(k, z, i_1, i_2, t) - P(k, \Delta t, i_1, i_2, t)) \times \\ & \quad \times (1 - i_1 \mu_1 \Delta t)(1 - i_2 \mu_2 \Delta t) + \\ & + \sum_v P(v, \Delta t, i_1 - 1, i_2 - 1, t) P_{vk} A_k(z) + \\ & + P(k, z, i_1 + 1, i_2, t)(i_1 + 1) \mu_1 \Delta t + \\ & + P(k, z, i_1, i_2 + 1, t)(i_2 + 1) \mu_2 \Delta t + o(\Delta t), \end{aligned}$$

из которых получим систему дифференциальных уравнений Колмогорова [8]

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(k, z, i_1, i_2, t)}{\partial t} = & \frac{\partial P(k, z, i_1, i_2, t)}{\partial z} - \frac{\partial P(k, 0, i_1, i_2, t)}{\partial z} - \\ & - P(k, z, i_1, i_2, t) i_1 \mu_1 - P(k, z, i_1, i_2, t) i_2 \mu_2 + \\ & + P(k, z, i_1 + 1, i_2, t)(i_1 + 1) \mu_1 + \\ & + P(k, z, i_1, i_2 + 1, t)(i_2 + 1) \mu_2 + \\ & + \sum_v \frac{\partial P(v, 0, i_1 - 1, i_2 - 1, t)}{\partial z} P_{vk} A_k(z). \end{aligned}$$

Для стационарного распределения вероятностей эту систему перепишем в виде:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P(k, z, i_1, i_2)}{\partial z} - \frac{\partial P(k, 0, i_1, i_2)}{\partial z} - \\ & - P(k, z, i_1, i_2) i_1 \mu_1 - P(k, z, i_1, i_2) i_2 \mu_2 + \\ & + P(k, z, i_1 + 1, i_2)(i_1 + 1) \mu_1 + \\ & + P(k, z, i_1, i_2 + 1)(i_2 + 1) \mu_2 + \\ & + \sum_v \frac{\partial P(v, 0, i_1 - 1, i_2 - 1)}{\partial z} P_{vk} A_k(z) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Введем функции, аналогичные характеристическим [8]

$$H(k, z, u_1, u_2) = \sum_{i_1=0}^{\infty} \sum_{i_2=0}^{\infty} e^{ju_1 i_1} e^{ju_2 i_2} P(k, z, i_1, i_2).$$

Тогда из системы уравнений (1), принимая во внимание, что

$$\begin{aligned} \frac{\partial H(k, z, u_1, u_2)}{\partial u_1} & = j \sum_{i_1=0}^{\infty} \sum_{i_2=0}^{\infty} i_1 e^{ju_1 i_1} e^{ju_2 i_2} P(k, z, i_1, i_2), \\ \frac{\partial H(k, z, u_1, u_2)}{\partial u_2} & = j \sum_{i_1=0}^{\infty} \sum_{i_2=0}^{\infty} i_2 e^{ju_1 i_1} e^{ju_2 i_2} P(k, z, i_1, i_2), \end{aligned}$$

для функций $H(k, z, u_1, u_2)$ запишем систему дифференциальных уравнений в частных производных [9]

$$\frac{\partial H(k, z, u_1, u_2)}{\partial z} - \frac{\partial H(k, 0, u_1, u_2)}{\partial z} +$$

$$\begin{aligned} & + j \mu_1 (1 - e^{-ju_1}) \frac{H(k, z, u_1, u_2)}{\partial u_1} + \\ & + j \mu_2 (1 - e^{-ju_2}) \frac{H(k, z, u_1, u_2)}{\partial u_2} + \\ & + e^{j(u_1 + u_2)} \sum_v \frac{\partial H(v, 0, u_1, u_2)}{\partial z} P_{vk} A_k(z) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Обозначив $\mathbf{H}(z, u_1, u_2) = \{H(1, z, u_1, u_2), H(2, z, u_1, u_2), \dots\}$

$$\mathbf{D}(z) = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1(z) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{A}_k(z) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & \dots & p_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & \dots & p_{kk} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix},$$

получим основное уравнение для исследования системы $MR^{(2)}|M_2|_{\infty}$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial z} \{e^{j(u_1 + u_2)} \mathbf{P} \mathbf{D}(z) - \mathbf{I}\} + \\ & + j \mu_1 (1 - e^{-ju_1}) \frac{\partial \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1} + \\ & + j \mu_2 (1 - e^{-ju_2}) \frac{\partial \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_2} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение $\mathbf{H}(z, u_1, u_2)$ дифференциально-матричного уравнения, удовлетворяющее условию $\mathbf{H}(z, 0, 0) = \mathbf{R}(z)$, определяет характеристические функции процессов $\{i_1(t)\}, \{i_2(t)\}$, описывающих число приборов, занятых в стационарном режиме в системе $MR^{(2)}|M_2|_{\infty}$, равенствами

$$\begin{aligned} h(u_1) & = M e^{ju_1 t} = \mathbf{H}(\infty, u_1, 0) \mathbf{E}, \\ h(u_2) & = M e^{ju_2 t} = \mathbf{H}(\infty, u_2, 0) \mathbf{E}. \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{R}(z)$ – вектор-функция стационарного распределения вероятностей значений двумерного марковского процесса $\{k(t), z(t)\}$.

Решение системы дифференциальных уравнений в частных производных (2) возможно найти только численными или асимптотическими [10] методами, но все вероятностные характеристики рассматриваемых процессов можно определить методом моментов [8].

Моменты первого порядка

Учитывая свойства характеристических функций [8]:

$$\left. \frac{\partial H(k, z, u_1, u_2)}{\partial u_1} \right|_{\substack{u_1=0 \\ u_2=0}} = j m_1^{(1)}(k, z),$$

$$\left. \frac{\partial H(k, z, u_1, u_2)}{\partial u_1} \right|_{\substack{u_1=0 \\ u_2=0}} = j m_1^{(1)}(k, z),$$

Для векторных функций имеем:

$$\left. \frac{\partial \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1} \right|_{\substack{u_1=0 \\ u_2=0}} = j \mathbf{m}_1^{(1)}(z) =$$

$$j[m_1^{(1)}(1, z), m_1^{(1)}(2, z), \dots],$$

$$\left. \frac{\partial \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_2} \right|_{\substack{u_1=0 \\ u_2=0}} = j \mathbf{m}_2^{(1)}(z) =$$

$$j[m_2^{(1)}(1, z), m_2^{(1)}(2, z), \dots].$$

Дифференцируя уравнение (3) по u_1 , получаем

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial z \partial u_1} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial z u_1} \{e^{j(u_1+u_2)} \mathbf{PD}(z) - \mathbf{I}\} +$$

$$+ \frac{\partial \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial z} e^{ju_2} j e^{ju_1} \mathbf{PD}(z) -$$

$$- j \mu_1 (-j) e^{-ju_1} \frac{\partial \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1} -$$

$$- j \mu_1 (e^{-ju_1} - 1) \frac{\partial^2 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1^2} -$$

$$- j \mu_2 (e^{-ju_2} - 1) \frac{\partial^2 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1 \partial u_2} = 0. \quad (4)$$

Положив $u_1=0, u_2=0$, получим систему дифференциальных уравнений для вектор-функции $\mathbf{m}^{(1)}(z) = \{m_1^{(1)}(1, z), m_1^{(1)}(2, z), \dots\}$

$$\frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(z)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} (\mathbf{PD}(z) - \mathbf{I}) +$$

$$+ \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \mathbf{PD}(z) - \mu_1 \mathbf{m}_1^{(1)}(z) = 0. \quad (5)$$

Эту систему дифференциальных уравнений будем решать с помощью преобразования Лапласа–Стилтьеса [8]

$$\phi_1(\alpha) = \int_0^\infty e^{-\alpha z} d\mathbf{m}_1^{(1)}(z), \quad \mathbf{D}^*(\alpha) = \int_0^\infty e^{-\alpha z} d\mathbf{D}(z).$$

Выполнив в (5) преобразование Лапласа–Стилтьеса, получим

$$\phi_1(\alpha) + \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} \frac{1}{\alpha} (\mathbf{PD}^*(\alpha) - \mathbf{I}) +$$

$$+ \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \frac{1}{\alpha} \mathbf{PD}^*(\alpha) - \frac{\mu_1}{\alpha} \phi_1(\alpha) = 0$$

или

$$(\mu_1 - \alpha) \phi_1(\alpha) = \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} (\mathbf{PD}^*(\alpha) - \mathbf{I}) +$$

$$+ \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \mathbf{PD}^*(\alpha). \quad (6)$$

Отсюда

$$\phi_1(\alpha) = \frac{1}{(\mu_1 - \alpha)} \left[\frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} (\mathbf{PD}^*(\alpha) - \mathbf{I}) + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \mathbf{PD}^*(\alpha) \right].$$

Положив в (6) $\alpha = \mu_1$, имеем:

$$\frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} (\mathbf{PD}^*(\mu_1) - \mathbf{I}) + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \mathbf{PD}^*(\mu_1) = 0,$$

$$\frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \mathbf{PD}^*(\mu_1) (\mathbf{I} - \mathbf{PD}^*(\mu_1))^{-1}.$$

Тогда

$$\mathbf{m}_1^{(1)}(\infty) = \phi_1(0) =$$

$$= \frac{1}{\mu_1} \left[\frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \times \right.$$

$$\left. \times \mathbf{PD}^*(\mu_1) (\mathbf{I} - \mathbf{PD}^*(\mu_1))^{-1} (\mathbf{PD}^*(0) - \mathbf{I}) + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \mathbf{PD}^* \right].$$

Для момента первого порядка числа занятых приборов в первом блоке системы $MR^{(2)}|M_2|_\infty$ можно записать

$$\bar{m}_1^{(1)}(\infty) = \mathbf{m}_1^{(1)}(\infty) \mathbf{E} = \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \mathbf{E} = \frac{\lambda}{\mu_1}.$$

Аналогично, для момента первого порядка числа занятых приборов во втором блоке системы $MR^{(2)}|M_2|_\infty$, получим равенство

$$\bar{m}_2^{(1)}(\infty) = \mathbf{m}_2^{(1)}(\infty) \mathbf{E} = \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \mathbf{E} = \frac{\lambda}{\mu_2}.$$

Моменты второго порядка

Найдём момент второго порядка числа занятых приборов в первом блоке системы $MR^{(2)}|M_2|_\infty$.

Продифференцируем по u_1 уравнение (4):

$$\frac{\partial^3 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial z \partial u_1^2} + \frac{\partial^3 \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial z u_1^2} \{e^{j(u_1+u_2)} \mathbf{PD}(z) - \mathbf{I}\} +$$

$$+ \frac{\partial^2 \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial z \partial u_1} e^{ju_2} j e^{ju_1} \mathbf{PD}(z) +$$

$$+ \frac{\partial^2 \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial z \partial u_1} e^{ju_2} j e^{ju_1} \mathbf{PD}(z) +$$

$$+ \frac{\partial \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial z} e^{ju_2} j^2 e^{ju_1} \mathbf{PD}(z) -$$

$$- \mu_1 (-j e^{-ju_1}) \frac{\partial \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1} - \mu_1 e^{-ju_1} \frac{\partial^2 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1^2} -$$

$$- j \mu_1 (-j e^{-ju_1}) \frac{\partial^2 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1^2} -$$

$$- j \mu_1 (-j e^{-ju_1} - 1) \frac{\partial^3 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1^3} -$$

$$- j \mu_2 (-j e^{-ju_2} - 1) \frac{\partial^3 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_2 \partial u_1^2} = 0. \quad (7)$$

Учитывая свойства характеристических функций:

$$\left. \frac{\partial^2 H(k, z, u_1, u_2)}{\partial u_1^2} \right|_{\substack{u_1=0 \\ u_2=0}} = j^2 m_1^{(2)}(k, z),$$

$$\left. \frac{\partial^2 H(k, z, u_1, u_2)}{\partial u_2^2} \right|_{\substack{u_1=0 \\ u_2=0}} = j^2 m_2^{(2)}(k, z).$$

Тогда для векторных функций имеем:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1^2} \right|_{\substack{u_1=0 \\ u_2=0}} &= j^2 \mathbf{m}_1^{(2)}(z) = \\ &= j^2 [m_1^{(2)}(1, z), m_1^{(2)}(2, z), \dots], \\ \left. \frac{\partial^2 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_2^2} \right|_{\substack{u_1=0 \\ u_2=0}} &= j^2 \mathbf{m}_2^{(2)}(z) = \\ &= j^2 [m_2^{(2)}(1, z), m_2^{(2)}(2, z), \dots]. \end{aligned}$$

Положив в (7) $u_1=0$, $u_2=0$, получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} j^2 \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(z)}{\partial z} + j^2 \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(0)}{\partial z} (\mathbf{PD}(z) - \mathbf{I}) + \\ + 2j^2 \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} \mathbf{PD}(z) + j^2 \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \mathbf{PD}(z) + \\ + \mu_1 j^2 \mathbf{m}_1^{(1)}(z) - 2\mu_1 j^2 \mathbf{m}_2^{(2)}(z) = 0 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(z)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(0)}{\partial z} (\mathbf{PD}(z) - \mathbf{I}) + \\ + \left(2 \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \right) \mathbf{PD}(z) + \\ + \mu_1 \mathbf{m}_1^{(1)}(z) - 2\mu_1 \mathbf{m}_2^{(2)}(z) = 0, \quad (8) \end{aligned}$$

решать которую будем также с помощью преобразования Лапласа–Стилтьеса.

Обозначив

$$\begin{aligned} \phi_1(\alpha) = \int_0^\infty e^{-\alpha z} d\mathbf{m}_1^{(1)}(z), \quad \phi_2(\alpha) = \int_0^\infty e^{-\alpha z} d\mathbf{m}_1^{(2)}(z), \\ \mathbf{D}^*(\alpha) = \int_0^\infty e^{-\alpha z} d\mathbf{D}(z) \end{aligned}$$

для (8) получаем:

$$\begin{aligned} \phi_2(\alpha) + \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(0)}{\partial z} \frac{1}{\alpha} (\mathbf{PD}^*(\alpha) - \mathbf{I}) + \\ + \left(2 \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \right) \frac{1}{\alpha} \mathbf{PD}^*(\alpha) + \\ + \frac{\mu_1}{\alpha} \phi_1(\alpha) - \frac{2\mu_1}{\alpha} \phi_2(\alpha) = 0, \\ (2\mu_1 - \alpha) \phi_2(\alpha) = \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(0)}{\partial z} (\mathbf{PD}^*(\alpha) - \mathbf{I}) + \\ + \left(2 \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \right) \mathbf{PD}^*(\alpha) + \mu_1 \phi_1(\alpha), \\ \phi_2(\alpha) = \frac{1}{2\mu_1 - \alpha} \times \\ \left\{ \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(0)}{\partial z} (\mathbf{PD}^*(\alpha) - \mathbf{I}) + \right. \\ \left. + \left(2 \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \right) \mathbf{PD}^*(\alpha) + \mu_1 \phi_1(\alpha) \right\}. \end{aligned}$$

Положив в $\alpha=2\mu_1$, определим неизвестный вектор $\frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(0)}{\partial z}$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(0)}{\partial z} = \\ = \left\{ \mu_1 \phi_1(2\mu_1) + \right. \\ \left. + \left(2 \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \right) \mathbf{PD}^*(2\mu_1) \right\} \times \\ \times (\mathbf{I} - \mathbf{PD}^*(2\mu_1))^{-1}. \end{aligned}$$

Тогда, учитывая, что

$$A_k^*(0) = \int_0^\infty dA_k(z) = A(\infty) - A(0) = 1,$$

$$\mathbf{D}^*(0) = \mathbf{I},$$

$$\phi_1(0)\mathbf{E} = \mathbf{m}_1^{(1)}(\infty)\mathbf{E} = \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \mathbf{E} = \frac{\lambda}{\mu_1},$$

для момента второго порядка числа занятых приборов в первом блоке системы $MR^{(2)}|M_2|_\infty$ можно записать

$$\begin{aligned} \bar{m}_1^{(2)}(\infty) = \mathbf{m}_1^{(2)}(\infty)\mathbf{E} = \phi_2(0)\mathbf{E} = \\ = \frac{1}{2\mu_1} \left\{ 2 \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} + \mu_1 \phi_1(0) \right\} \mathbf{E} = \\ = \frac{1}{2\mu_1} \left\{ 2 \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} \mathbf{E} + \lambda + \lambda \right\} = \\ = \frac{1}{\mu_1} \left\{ \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} \mathbf{E} + \lambda \right\} = \\ = \frac{\lambda}{\mu_1} [(\mathbf{I} - \mathbf{PD}^*(\mu_1))^{-1} \mathbf{PD}^*(\mu_1)\mathbf{E} + 1]. \end{aligned}$$

Повторив все выкладки, аналогично получаем выражение для момента второго порядка числа занятых приборов во втором блоке системы $MR^{(2)}|M_2|_\infty$:

$$\bar{m}_2^{(2)}(\infty) = \frac{\lambda}{\mu_2} [(\mathbf{I} - \mathbf{PD}^*(\mu_2))^{-1} \mathbf{PD}^*(\mu_2)\mathbf{E} + 1].$$

Аналогично можно найти моменты более высокого порядка для числа приборов, занятых в системе $MR^{(2)}|M_2|_\infty$.

Корреляционный момент

Дифференцируя уравнение (4) по u_2 , получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial z \partial u_1 \partial u_2} + \frac{\partial^3 \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial z u_1 \partial u_2} (e^{j(u_1+u_2)} \mathbf{PD}(z) - \mathbf{I}) + \\ + \frac{\partial^2 \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial z \partial u_2} e^{ju_1} j e^{ju_2} \mathbf{PD}(z) + \\ + \frac{\partial^2 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial z \partial u_2} e^{ju_2} j e^{ju_1} \mathbf{PD}(z) + \\ + \frac{\partial \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial z} j e^{ju_2} j e^{ju_1} \mathbf{PD}(z) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -j\mu_1(-j)e^{-ju_1} \frac{\partial^2 \mathbf{H}(0, u_1, u_2)}{\partial u_1 \partial u_2} - \\
 & -j\mu_1(e^{-ju_1} - 1) \frac{\partial^3 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1^2 \partial u_2} - \\
 & -j\mu_2(-j)e^{-ju_2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1 \partial u_2} - \\
 & -j\mu_2(e^{-ju_2} - 1) \frac{\partial^3 \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1 \partial u_2^2} = 0.
 \end{aligned}$$

Учитывая свойства характеристических функций, имеем:

$$\left. \frac{\partial \mathbf{H}(z, u_1, u_2)}{\partial u_1 \partial u_2} \right|_{u_1=0, u_2=0} = j\mathbf{m}_{12}(z) = j[m(1, z), m(2, z), \dots].$$

Тогда, положив $u_1=0$, $u_2=0$, получим систему дифференциальных уравнений для нахождения корреляционного момента:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \mathbf{m}_{12}(z)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{m}_{12}(0)}{\partial z} (\mathbf{PD}(z) - \mathbf{I}) + \\
 & + \left(\frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(0)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \right) \times \\
 & \times \mathbf{PD}(z) - (\mu_1 + \mu_2) \mathbf{m}_{12}(z) = 0.
 \end{aligned}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таташев А.Г. Система массового обслуживания с групповым поступлением и инверсионной дисциплиной // Кибернетика и системный анализ. – 1995. – № 6. – С. 163–165.
2. Таташев А.Г. Одна инверсионная дисциплина обслуживания в одноканальной системе с разнотипными заявками // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 7. – С. 177–181.
3. Печинкин А.В. Инверсионный порядок обслуживания с вероятностным приоритетом в системе обслуживания с неординарным входящим потоком // Случайные процессы и их приложения. Математические исследования. – Кишинёв: Штиинца, 1989. – Вып. 109. – xxx с.
4. Печинкин А.В. Об одной инвариантной системе массового обслуживания // Math. Operationsforsch. und Statist. Ser. Optimization. – 1983. – V. 14. – № 3. – P. 433–444.
5. Бочаров П.П., Д'Апиче Ч., Мандзо Р., Фонг Н.Х. Об обслуживании многомерного пуассоновского потока на одном приборе с конечным накопителем и повторными заявками // Про-

блемы передач информации. – 2001. – Т. 37. – № 4. – С. 130–140.

Используя аналогичные преобразования, можно записать корреляционный момент процессов $\{i_1(t)\}, \{i_2(t)\}$

$$\begin{aligned}
 \bar{\mathbf{m}}_{12}(\infty) &= \mathbf{m}_{12}(\infty) \mathbf{E} = \phi_{12}(0) \mathbf{E} = \\
 &= \frac{1}{\mu_1 + \mu_2} \left\{ \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(0)}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{R}(0)}{\partial z} \right\} \mathbf{E} = \\
 &= \frac{1}{\mu_1 + \mu_2} \left\{ \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(1)}(0)}{\partial z} \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{m}_1^{(2)}(0)}{\partial z} \mathbf{E} + \lambda \right\} = \\
 &= \frac{\lambda}{\mu_1 + \mu_2} [(\mathbf{I} - \mathbf{PD}^*(\mu_1 + \mu_2))^{-1} \mathbf{PD}^*(\mu_1 + \mu_2) \mathbf{E} + 1].
 \end{aligned}$$

Таким образом, в работе рассмотрена математическая модель параллельного обслуживания кратных заявок в виде системы массового обслуживания с параллельно функционирующими блоками. Методом введения дополнительных компонент проведена марковизация исследуемого процесса, что позволило получить систему дифференциальных уравнений Колмогорова для характеристических функций. Методом моментов найдены основные вероятностные характеристики двумерного процесса, характеризующего число заявок, находящихся на обслуживании в каждом блоке, а именно моменты первого и второго порядка. Используемый метод позволяет найти точные характеристики любого порядка.

6. Чельницкий А.А., Кучеренко О.В. Стационарные характеристики параллельно функционирующих систем обслуживания с двумерным входным потоком // Сборник научных статей. – Минск, 2009. – Вып. 2. – С. 262–268.
7. Назаров А.А., Терпугов А.Ф. Теория вероятностей и случайных процессов. – Томск, Изд-во НТЛ, 2006. – 204 с.
8. Назаров А.А., Терпугов А.Ф. Теория массового обслуживания. – Томск, Изд-во НТЛ, 2004. – 228 с.
9. Эльцгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1969. – 424 с.
10. Назаров А.А., Моисеева С.П. Метод асимптотического анализа в теории массового обслуживания. – Томск, Изд-во НТЛ, 2006. – 112 с.

Поступила 19.11.2012 г.

УДК 681.50

СИНТЕЗ ЛИНЕЙНЫХ РОБАСТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ИНТЕРВАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ MDSLS

С.А. Гайворонский, Т.А. Езангина

Томский политехнический университет
E-mail: saga@tpu.ru, eza-tanya@yandex.ru

Разработан программный продукт для синтеза систем автоматического управления с гарантированными корневыми показателями качества. Алгоритмы реализации основаны на робастном расширении оценки показателя качества системы. Приводятся числовые примеры.

Ключевые слова:

Интервальный полином, синтез регулятора, максимальная степень устойчивости.

Key words:

Interval polynomial, synthesis of controller, maximum degree of stability.

Введение

Система автоматического управления (САУ), предназначенная для управления каким-либо технологическим процессом или агрегатом, должна быть работоспособной, а также обладать свойствами, удерживающими параметры в таких пределах, чтобы не происходило существенных нарушений технологических процессов или работы агрегата.

Важнейшей задачей совершенствования систем управления является повышение качества управления и стабилизации технологических параметров в достаточно узких пределах. Решение задачи обеспечения заданного качества управления является актуальным как при проектировании САУ, так и при их промышленной эксплуатации. Наиболее остро требования качественной настройки регуляторов проявляются на предприятиях, где необходима стабилизация важных для этой отрасли параметров, например, в теплоэнергетической и нефтегазовой отрасли, а также при управлении сложными робототехническими комплексами.

Задача качественной настройки регуляторов усложняется при наличии параметрической неопределенности. Если известны диапазоны возможных значений постоянных параметров или пределы изменения нестабильных параметров, то говорят об их параметрической интервальности. Для оценки работоспособности таких систем желательно определить ее наихудшее качество и сравнить с допустимым. Наихудшее качество называют робастным и определяют при наихудших сочетаниях интервальных коэффициентов интервального характеристического полинома (ИХП) [1].

Для анализа качества интервальных САУ предлагается использовать его оценки, определяемые на основе коэффициентов ИХП. Они наиболее просто и непосредственно связаны с физическими параметрами системы, выбираемыми при ее проектировании. Это обстоятельство является одной из причин интереса к коэффициентным методам оценки устойчивости и качества динамических систем [2].

Большее внимание в настоящее время уделяется решению задач синтеза систем управления с максимальной степенью устойчивости [3–5]. Предложенные там методы основаны на использовании нормированных полиномов и применении к ним достаточных условий оптимальности по степени устойчивости. Однако разработанные подходы приемлемы, как правило, только для САУ низких порядков.

В связи с этим решение поставленной задачи предлагается проводить с применением коэффициентных оценок показателей качества, на основе которых разработаны простые достаточные условия устойчивости и качества САУ произвольного порядка [2].

Очевидно, что для проектировщика САУ желательно иметь удобный и эффективный инструмент, позволяющий проводить синтез САУ с использованием современного программного обеспечения (пакеты Mathcad, MATLAB, Maple, Borland C++). В частности, язык программирования C++ обладает определенными преимуществами перед остальными, имеет простой, но достаточно гибкий входной язык программирования, библиотеки стандартных подпрограмм – функций.

Целью данной работы является разработка на основе коэффициентного метода отдельного модуля для синтеза интервальной системы (ИС) с максимальной степенью устойчивости на языке программирования высокого уровня C++. Такой программный продукт получил название «Максимизация степени устойчивости линейной системы» (MDSLS).

Постановка задачи

Пусть САУ включает объект управления W_{oy} и регулятор W_p . Объект управления описывается передаточной функцией

$$W_{oy}(s) = \frac{b}{A(s)}, \quad A(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^i,$$

где $\underline{a}_i \leq a_i \leq \bar{a}_i$ (\underline{a}_i – нижний предел; \bar{a}_i – верхний предел) – коэффициенты полинома $A(s)$; b – коэффи-

циент передачи объекта управления; s – оператор Лапласа. Передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_p(s, \vec{k}) = f(s, \vec{k}),$$

где \vec{k} – вектор настраиваемых параметров регулятора. Тогда характеристический полином САУ может быть представлен в виде

$$D(s, \vec{k}) = \sum_{i=0}^m d_i(\vec{k}) s^i. \quad (1)$$

Область возможных значений интервальных параметров системы (многогранник Pn , являющийся прямоугольным гиперпараллелепипедом) отображается на комплексную плоскость корней в виде областей их локализации и отрезков вещественной оси, где локализуются вещественные корни (рис. 1). Необходимо выбрать такие значения параметров вектора \vec{k} , которые на основе достаточных условий коэффициентного метода [5] обеспечивают максимизацию степени устойчивости η_{\max}^* САУ при заданной добротности D системы по скорости и расположении корней полинома (1) в заданном секторе $\pm\varphi$. Корни полинома при этом должны лежать левее вертикальной прямой, проходящей через точку $(-\eta_{\max}^*, j0)$, как показано на рис. 1.

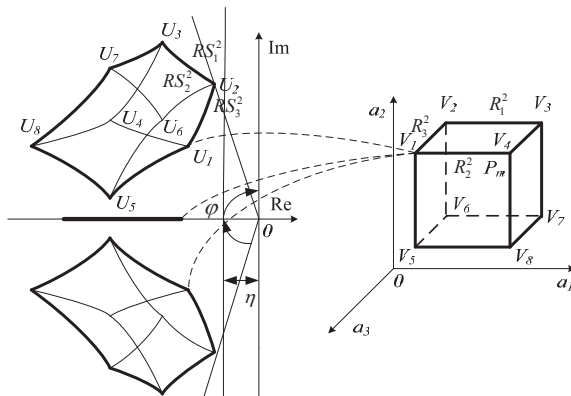


Рис. 1. Отображение параметрического многогранника САУ

Условия обеспечения желаемых показателей качества и точности интервальной системы

Для определения точности системы в установленном режиме необходимо воспользоваться выражением установившейся ошибки САУ [1]

$$\varepsilon_{ув}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \varepsilon_u(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{dA(s)}{s(sA(s) + k_p b)} = \frac{d}{k_p},$$

где $k_p = D_w$ – передаточный коэффициент разомкнутой системы, называемый добротность по скорости.

Тогда для заданной передаточной функции объекта управления $W_{ov}(s)$ и функции регулятора $W_p(s)$ величина добротности по скорости будет определяться выражением

$$D = \frac{k_0 b}{d_0}.$$

Введём в рассмотрение основные коэффициентные показатели качества и на их основе найдем выражения для определения максимальной степени устойчивости и соответствующих ей параметров регулятора. Склонность системы к колебаниям проявляется при наличии в решении ее характеристического уравнения комплексных корней вида $-\alpha + j\beta$. Если имеются корни характеристического уравнения, то легко определить связанный с колебательностью системы угловой сектор $\pm\varphi$, в пределах которого расположены все его корни. Однако эту характеристику системы желательно получить непосредственно по коэффициентам характеристического полинома. Согласно [2], для анализа колебательности стационарной системы на основе коэффициентного метода используют параметры:

$$\delta_i = \frac{d_i^2}{(d_{i-1} d_{i+1})} \quad i = \overline{1, n-1}.$$

Эти параметры являются безразмерными и называются показателями колебательности [5]. В [5] на основе δ_i приведено достаточное условие заданной колебательности: для расположения корней характеристического полинома САУ в заданном секторе $\pm\varphi$ достаточно выполнения условий:

$$\delta_i \geq \delta_\varphi(n, \varphi), \quad \forall i = \overline{1, n-1},$$

где δ_φ – допустимый показатель колебательности, определяемый из таблицы.

Таблица. Зависимость δ_φ от порядка системы и размера сектора

n	φ					
	65°	70°	75°	80°	85°	90°
3		1,684	1,518	1,348	1,175	1
4	1,846	1,75	1,696	1,609	1,515	$\sqrt{2}$
5					1,52	1,465

На основе данного условия авторами сформулировано следующее утверждение.

Утверждение 1. Для того чтобы корни интервального полинома (1) лежали в заданном угловом секторе, необходимо выполнение условий

$$\delta_i = \frac{d_i^2}{\underline{d}_{i-1} \overline{d}_{i+1}} > \delta_\varphi, \quad i = \overline{1, n-1},$$

где \underline{d}_i – нижний предел; \overline{d}_i – верхний предел.

Доказательство. Пусть $d_i^2 = m$, а $n = \overline{d_{i-1} d_{i+1}}$. Согласно [5], для оценки колебательности системы с переменными параметрами желательно определить ее наихудшее качество в наихудшем режиме. В данном случае система обладает наихудшим качеством, если

$$\delta_i \rightarrow \min. \quad (2)$$

Для выполнения условия (2) необходимо, чтобы

$$m \rightarrow \min, \quad n \rightarrow \max. \quad (3)$$

Очевидно, что (3) достигается при выборе следующих пределов: $m = \underline{d}_i$, а коэффициента $n = \overline{d}_{i-1} \overline{d}_{i+1}$. Если условия (3) выполняется для указанных пределов интервальных коэффициентов, то они выполняются и для всех других их значений из заданных интервалов.

Введем вспомогательные параметры λ_i , образуемые четверками рядом стоящих коэффициентов характеристического полинома

$$\lambda_i = \frac{\underline{d}_{i-1} \overline{d}_{i+2}}{(\underline{d}_i \overline{d}_{i+1})} \quad i = \overline{1, n-2}.$$

Параметры λ_i называют показателями устойчивости [5]. На основе λ_i в [5] разработано достаточное условие устойчивости стационарной системы: для устойчивости системы с заданным характеристическим полиномом достаточно, чтобы выполнялись неравенства:

$$\lambda_i < \lambda^* \approx 0,465 \quad \forall i = \overline{1, n-2}.$$

На основе этого условия авторами сформулировано следующее утверждение.

Утверждение 2. Чтобы все корни интервального полинома (1) лежали левее вертикальной прямой, проходящей через точку $(-\eta, j0)$, $0 \leq \eta < \infty$, достаточно выполнения условий

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_i &= \frac{\overline{d}_{i-1} \overline{d}_{i+2}}{(\underline{d}_i - \underline{d}_{i+1})(n-i-1)\eta(\underline{d}_{i+1} - \underline{d}_{i+2})(n-i-2)\eta)} < \\ &< 0,465 \quad i = \overline{1, n-2} \\ \underline{d}_i &\leq \overline{d}_{i+1}(n-i-1)\eta \\ \underline{d}_0 - \underline{d}_1\eta + 2\underline{d}_2 \frac{\eta^2}{3} &\geq 0. \end{aligned} \right.$$

Доказательство. Согласно [2] для оценки степени устойчивости ИС с интервальными параметрами желательно определить ее наихудшее качество, а именно максимальные значения ее показателей устойчивости, то есть

$$\lambda_i \rightarrow \max. \quad (4)$$

Введем обозначения

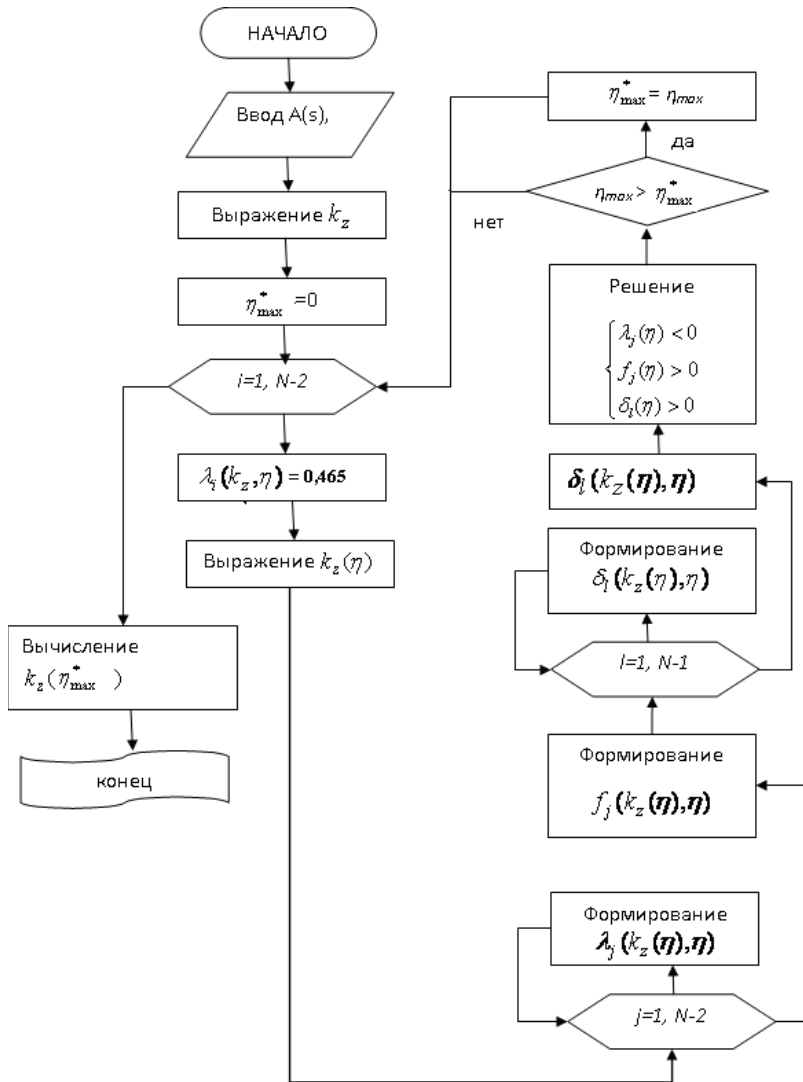


Рис. 2. Алгоритм синтеза линейных регуляторов интервальной САУ

$$\begin{aligned}
 d_{i-1} d_{i+2} &= m(d_i - d_{i+1}(n-i-1)\eta) \times \\
 &\times (d_{i+1} - d_{i+2}(n-i-2)\eta) = \\
 n \cdot \varepsilon_{inv}(s) &= \lim_{s \rightarrow 0} s \varepsilon_u(s) = \\
 &= \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{dA(s)}{s(sA(s) + k_p b)} = \frac{d}{k_p},
 \end{aligned}$$

Очевидно, что условие (4) выполняется при $m \rightarrow \max$ и $n \rightarrow \min$. (5)

На основе интервального анализа условия (5) выполняются при $\underline{d}_{i-1} \overline{d}_{i+2}$ и

$$n = (\underline{d}_i - \overline{d}_{i+1}(n-i-1)\eta)(\overline{d}_{i+1} - \underline{d}_{i+2}(n-i-2)\eta).$$

Если условия (4) выполняются для указанных пределов интервальных коэффициентов, то они выполняются и для всех других их значений из заданных интервалов. Данное утверждение позволяет оценить робастную степень устойчивости ИС. Для его применения к ИС с целью определения максимальной робастной степени устойчивости сформулировано следующее утверждение.

Утверждение 3. Для определения максимальной робастной степени устойчивости ИС необходимо для всех вариантов сочетаний интервальных коэффициентов выбором параметров регулятора обеспечить максимальное значение η_{\max} в $(n-2)$ системах

$$\left\{ \begin{aligned}
 \lambda_i &= \frac{\overline{d}_{i-1} \overline{d}_{i+2}}{(\underline{d}_i - \overline{d}_{i+1}(n-i-1)\eta)(\overline{d}_{i+1} - \underline{d}_{i+2}(n-i-2)\eta)} = \\
 &= 0,465, i = \overline{1, n-2} \\
 \lambda_j &< 0,465, j = \overline{1, n-2}, j \neq i \\
 \underline{d}_i &\leq \overline{d}_{i+1}(n-i-1)\eta \\
 \underline{d}_0 - \overline{d}_1\eta + 2\underline{d}_2 \frac{\eta^2}{3} &\geq 0.
 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Доказательство. Увеличивать значение η в системе (6), меняя параметры регулятора, можно до тех пор, пока $\lambda_i = 0,465 \forall i = \overline{1, n-2}$. При $\lambda_i = 0,465$ получаем максимальное значение показателя устойчивости λ_i , соответствующее наибольшей степени устойчивости системы. При этом интервалы коэффициентов полинома выбираются в соответствии с утверждением 2.

Алгоритм синтеза линейных регуляторов интервальной САУ

Для параметрического синтеза линейных регуляторов интервальных САУ разработан алгоритм, схема которого приведена на рис. 2.

Описание программного продукта

На основе составленного алгоритма разработан программный продукт MDSLS (создан в программном пакете Borland C++). Интерфейс модуля предполагает выбор типа регулятора и заданных ограничений (требуемой добротности САУ и допустимого показателя колебательности), а также возможность задавать значения коэффициентов объекта управления. На рис. 3 приведено главное окно ПП MDSLS.

Приведем ниже назначение, входные и выходные параметры функций ПП MDSLS:

- double functionobject (double *d₁, double *d₂) формирует интервальный характеристический полином D(s).
- double functionkd (double k₀) возвращает вычисленное значение параметра k₀ при ограничении на добротность.
- double functionq (double *q) формирует массив значений, состоящий из показателей колебательности.
- double functionkq (double k₁) вычисляет значение параметра k₁ при заданном ограничении на показатель колебательности.

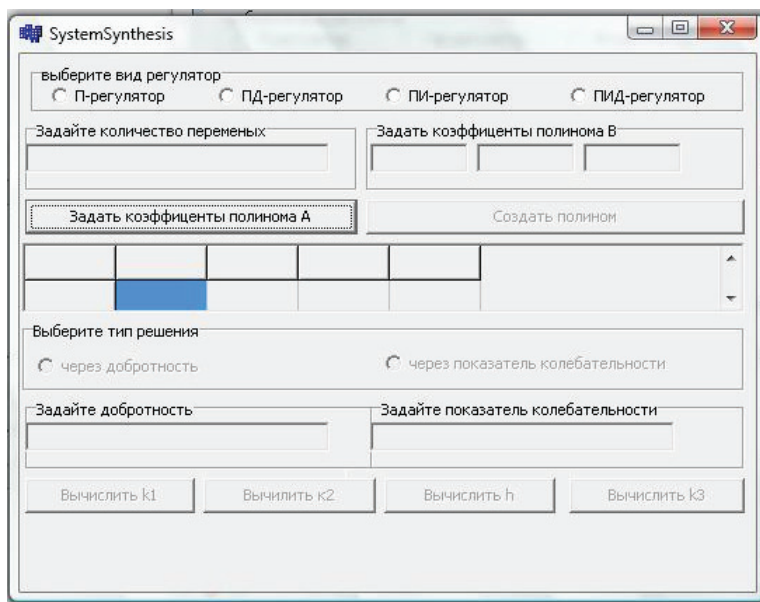


Рис. 3. Главное окно ПП MDSLS

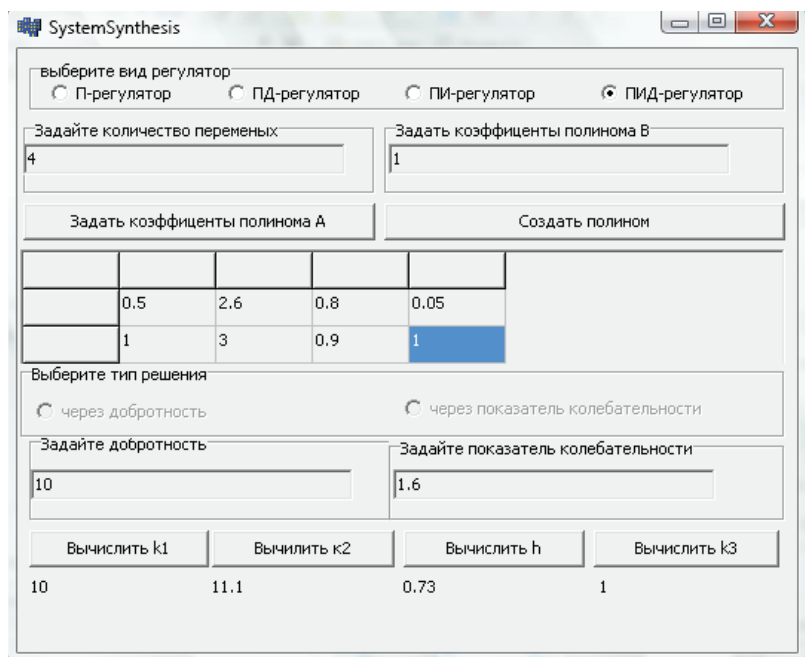


Рис. 4. Результаты синтеза регулятора в системе MDSLS

- `double functionalpha (double *a)` необходима для получения уравнения $\lambda_i=0,465$.
- `double functionh (double h)` возвращает значение максимальной робастной степени устойчивости.
- `double functionaf (double *f)` формирует дополнительные функции $f(\eta)$ для системы неравенств (6).
- `double functionk0h (double k1,h)` находит значение параметра k_0 при известном значении максимальной степени устойчивости.
- `double functionk1h (double k1)` вычисляет значение параметра k_1 при известном значении максимальной степени устойчивости.

Численный пример параметрического синтеза регулятора

Пусть коэффициенты интервального объекта управления принимают следующие значения $a_3 \in [0,05;0,1]$, $a_2 \in [0,8;0,9]$, $a_1 \in [2,6;3]$, $a_0 \in [0,5;1]$, $b=1$.

Требуется обеспечить в САУ максимальную степень устойчивости при заданной добротности по скорости $D=10$ и ограничении степени колебательности величиной, равной 1,6.

На основе приведенной выше методики найдем решение поставленной задачи с помощью ПИД-регулятора. Используя пакет MDSLS, рассчитаны

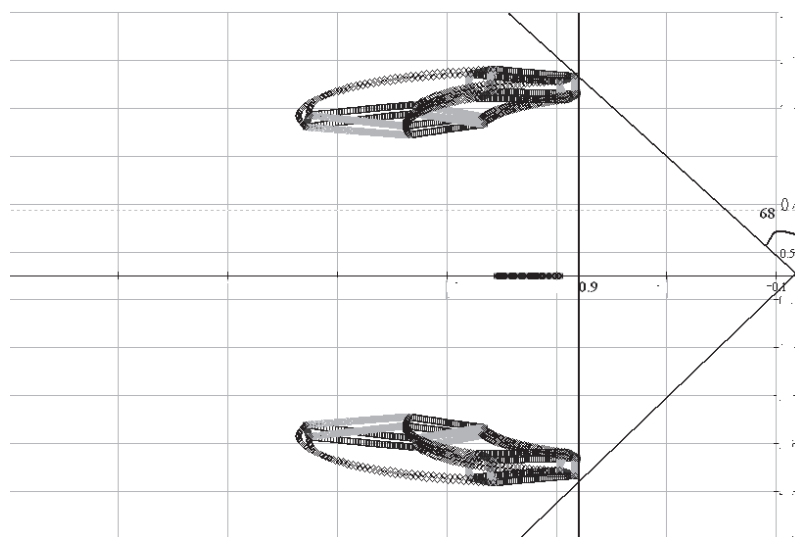


Рис. 5. Области локализации корней с найденными настройками ПИД-регулятора

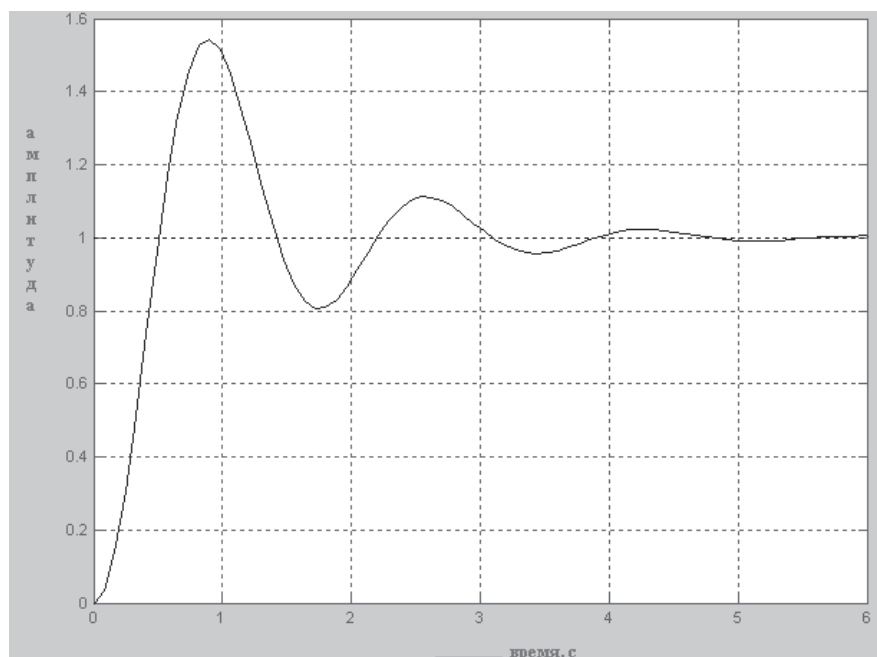


Рис. 6. Переходные характеристики системы

настройки ПИД-регулятора, обеспечивающие ограничение на степень колебательности величины, равной 1,6. Значения параметров ПИД-регулятора приведены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что степень устойчивости $\eta=0,73$, параметры регулятора $k_0=0$, $k_1=11,1$, $k_2=1$.

На рис. 5 приведена область локализации корней характеристического полинома ИС при найденных настройках ПИД-регулятора.

Из рис. 5 видно, что САУ имеет реальную максимальную степень устойчивости $\eta=-0,9$. При этом выполняются предъявленные к системе требования: добротность по скорости соответствует заданной величине, и степень колебательности интервальной САУ не превышает $\mu=\text{tg}(68^\circ)=1,6$.

Переходные характеристики системы с синтезированным ПИД-регулятором изображены на рис. 6. Из рис. 6 можно сделать вывод, что время переходного процесса $t_n=4,2$ с, что соответствует найденной степени устойчивости ИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляк Б.Т., Щербakov П.С. Робастная устойчивость и управление. — М.: Наука, 2002. — 303 с.
2. Петров Б.Н., Соколов Н.И., Липатов А.В. и др. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами: Инженерные методы анализа и синтеза. — М.: Машиностроение, 1986. — 256 с.
3. Шубладзе А.М. Способы синтеза систем управления максимальной степенью устойчивости // АиТ. — 1980. — № 1. — С. 28–37.

Заключение

1. Разработанный алгоритм синтеза линейного регулятора использует коэффициентные оценки показателей качества системы, на основе которых формируются упрощенные алгебраические соотношения между оценкой снизу степени устойчивости системы и коэффициентами характеристического полинома.
2. Робастная устойчивость системы автоматического управления достигается путем расположения областей локализации ее полюсов левее максимальной оценки снизу степени устойчивости системы, что обеспечивает максимальное быстродействие и снижает колебательность.
3. Разработан программный модуль на языке C++, позволяющий на ПЭВМ определять настройки линейного регулятора, обеспечивающего максимальную степень устойчивости при заданных ограничениях.
4. Работоспособность разработанного алгоритма проверена на числовом примере при расчете настроек ПИД-регулятора.

4. Ким Д.П. Синтез регулятора максимальной степени устойчивости // Приводная техника. — 2003. — № 4. — С. 52–57.
5. Волков А.Н., Загашвили Ю.В. Метод синтеза систем автоматического управления с максимальной степенью устойчивости при наличии ограничений // Известия РАН. Сер. Теория и системы управления. — 1997. — № 3. — С. 12–19.

Поступила 25.06.2012 г.

УДК 665.6/.7; 004.942

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДГОТОВКИ ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Н.В. Ушева, О.Е. Мойзес, Е.А. Кузьменко, Е.С. Хлебникова

Томский политехнический университет

E-mail: moe@tpu.ru

Разработан модуль оптимизации поиска наиболее эффективного технологического режима промышленной подготовки газового конденсата. Выполнены исследования с применением моделирующей системы влияния термобарических параметров на процесс низкотемпературной сепарации, определен оптимальный технологический режим.

Ключевые слова:

Газовый конденсат, сепарация, технологические режимы, оптимизация, моделирующая система.

Key words:

Gas condensate, separation, processing modes, optimization, simulation system.

Разработка современных технологических процессов подготовки и переработки природного углеводородного сырья и оптимальная эксплуатация действующих производств в настоящее время невозможна без применения современных моделирующих программ, имеющих высокую точность описания параметров технологических процессов и позволяющих без значительных материальных и временных затрат выполнять исследования этих процессов. Такие модельные исследования имеют огромное значение не только для проектирования, но и для функционирования существующих производств, так как позволяют учесть влияние внешних факторов (изменение состава сырья, изменение требований к конечным продуктам и т. д.) на показатели действующих производств [1].

В настоящее время инженерам-технологам доступно большое число программных средств моделирования химико-технологических процессов. Эти средства в основном разработаны фирмами

США и Канады и являются универсальными при проведении инженеринговых расчетов.

Однако для повышения эффективности и поиска оптимальных режимов действующих промышленных установок целесообразно применять моделирующие системы, адаптированные к технологическим условиям конкретного промышленного объекта.

Разработанная нами моделирующая система (МС) комплексной подготовки газа и газового конденсата [2–4] имеет модульную структуру и включает математические модели процессов сепарации, каплеобразования, разделения жидкостей с учетом отделения водометанольных растворов [5, 6] и применяется для прогнозирования работы установок комплексной подготовки газовых конденсатов (УКПГ).

Целью работы является совершенствование моделирующей системы, разработка модуля расчета оптимальных режимов УКПГ и исследование влияния технологических параметров на выход

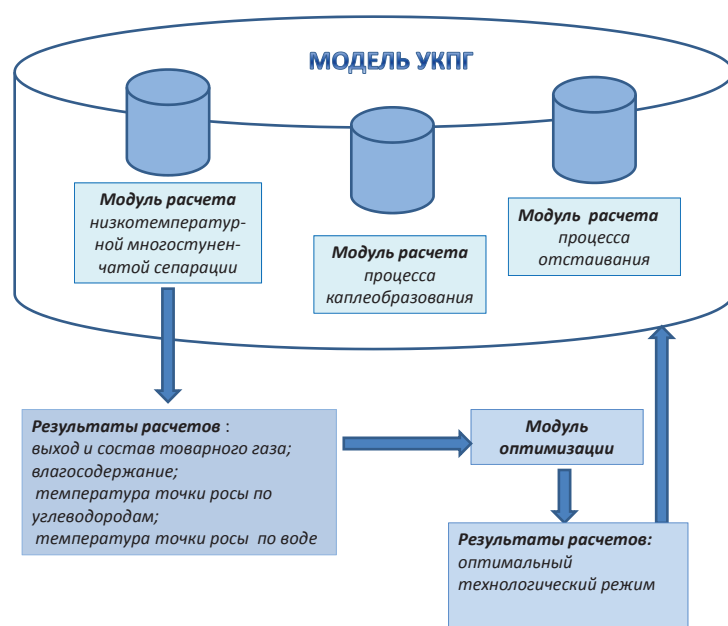


Рис. 1. Схема моделирующей системы технологии комплексной подготовки газового конденсата

и качество подготовки товарного газа процесса многоступенчатой низкотемпературной сепарации.

Структура усовершенствованной моделирующей системы, дополненной блоком оптимизации и моделями расчета температур точек росы по углеводородам и воде, приведена на рис. 1.

При промышленной подготовке газа высокая четкость разделения пластовой смеси определяет качество транспортируемых продуктов и, следовательно, экономическую эффективность производства.

Известно, что основными показателями качества товарного газа являются: температура точки росы по углеводородам и воде. В разработанной нами ранее моделирующей системе не был предусмотрен расчет температуры точки росы по воде.

Поэтому на основании данных ГОСТ Р 53763-2009 «Газы горючие природные. Определение температуры точки росы по воде» была получена зависимость температуры точки росы по воде от влагосодержания и давления товарного газа в газопроводе, которая включена в модуль расчета основных показателей качества товарного газа:

$$y = b_0 + b_1 W + b_2 P + b_3 \ln(W) + b_4 \ln(P),$$

где y – температура точки росы, °С; b_i – коэффициенты в уравнении регрессии; P – давление, МПа; W – влагосодержание, г/м³.

Значения коэффициентов полинома, рассчитанные с помощью программы STATISTICA, и абсолютная погрешность расчета температуры точки росы по воде приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов полинома

Диапазон давлений, МПа	Коэффициенты					Абсолютная погрешность температуры точки росы по воде, °С
	b0	b1	b2	b3	b4	
2,4...3	2,417662	17,70726	-0,25352	9,474480	11,56512	0,48
3...3,6	2,639120	18,76646	-0,191400	9,592568	11,38404	0,40
3,6...4,2	3,995595	19,73325	0,974113	9,65309	7,097624	0,35
4,2...4,8	6,759723	20,4702	1,524424	9,678565	3,554454	0,40
4,8...5,4	3,21795	21,17595	0,021408	9,712674	10,42282	0,34
5,4...6	5,40595	21,7098	0,486759	9,733106	7,634486	0,39
2,4...6	2,55568	20,1277	-0,199590	9,639727	11,47359	1,06

Следует отметить, что максимальная абсолютная погрешность результатов расчета по данной формуле для широкого диапазона давлений значительно превышает максимальные погрешности, соответствующие эмпирическим зависимостям для узких диапазонов давлений. Поэтому в математическое описание включены зависимости с коэффициентами уравнения для узких интервалов варьирования давления (табл. 1).

Таблица 3. Состав пластового газа

Компонент	CO ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	i-C ₅ H ₁₂	n-C ₅ H ₁₂	C ₆ +	H ₂ O
Концентрация, мольн. %	0,02	3,88	85,92	3,48	2,64	0,80	0,88	0,38	0,20	1,04	0,76

С применением моделирующей системы были выполнены исследования при варьировании технологических параметров для трехступенчатой схемы низкотемпературной сепарации газового конденсата.

При проведении исследований варьировались температура и давление на различных ступенях сепарации. Интервал изменения температуры: ±5 °С; давления: ±1 МПа от значений параметров базового варианта (табл. 2). Состав сырьевого потока приведен в табл. 3.

Таблица 2. Значения технологических параметров базового варианта (расход пластовой смеси G=110550 кг/ч)

Сепаратор	Параметр	
	Температура, °С	Давление, МПа
1	22,5	5,6
2	0,5	7,1
3	-33,7	3,9

Были рассчитаны основные показатели процесса сепарации: выход товарного газа, выход нестабильного конденсата, содержание углеводородов C₃₊, C₅₊, влагосодержание, точка росы по углеводородам и по воде (табл. 4).

Установлено, что понижение температуры либо повышение давления на первой ступени сепарации наряду с увеличением выхода конденсата (C₅₊) приводит также к повышению степени конденсации легких компонентов газа, а следовательно, к уменьшению расхода газа из первого сепаратора (С1). Аналогичные явления характерны для второго (С2) и третьего (С3) сепараторов.

Определено, что на выход товарного газа в исследованном диапазоне варьирования параметров существенное влияние оказывает изменение температуры и давления в третьем сепараторе.

Повышение эффективности работы действующих установок и обеспечение требуемого количества и качества товарной продукции, возможно за счет оптимизации технологических режимов УКПГ.

При выборе оптимальных условий процесса подготовки газового конденсата возникает необходимость проведения большого количества расчетов при варьировании технологических параметров и анализа значительного объема информации.

Для обработки данных вычислительного эксперимента был разработан модуль MS, позволяющий автоматизировать процесс выбора наиболее эффективного технологического режима.

Для определения оптимальных условий работы УКПГ газоконденсатного месторождения в качестве технологического критерия оптимальности выбран наибольший выход товарного газа с ограничениями по показателям качества его подготовки (температура точки росы по воде и по углеводородам) в соответствии с СТО Газпром 089–2010. Выбраны оптимизирующие параметры: давление и температура.

Таблица 4. Результаты исследований процесса сепарации

№ варианта	№ сепаратора	Выход товарного газа, т/ч	Основные показатели качества товарного газа					
			Температура в аппарате, °С	Точка росы по углеводородам, °С	Точка росы по воде, °С	Влагосодержание, г/м³	C ₃₊ , г/м³	C ₅₊ , г/м³
1	1	98,26	27,5	-24,07	-13,8	0,036	67,4	2,0
2	1	98,28	22,5	-23,97	-14,7	0,033	67,2	2,1
3	1	98,30	17,5	-23,92	-15,6	0,030	67,6	2,1
4	2	98,10	5,5	-25,00	-12,7	0,040	66,3	2,0
5	2	98,28	0,5	-23,97	-14,7	0,033	67,2	2,1
6	2	98,45	-4,5	-22,91	-16,7	0,027	68,7	2,1
7	3	99,17	-28,7	-19,52	-7,6	0,064	73,5	2,9
8	3	98,28	-33,7	-23,97	-14,7	0,033	67,2	2,1
9	3	97,38	-38,7	-29,20	-21,3	0,017	61,4	1,4
	Давление, МПа							
10	1	98,27	4,6	-24,00	-13,5	0,037	67,5	2,0
11	1	98,28	5,6	-23,97	-14,7	0,033	67,2	2,1
12	1	98,29	6,6	-23,92	-16,0	0,029	67,6	2,1
13	2	98,24	6,1	-24,25	-13,5	0,037	67,2	2,0
14	2	98,28	7,1	-23,97	-14,7	0,033	67,2	2,1
15	2	98,32	8,1	-23,73	-16,0	0,029	67,8	2,1
16	3	99,00	2,9	-24,71	-8,7	0,058	72,3	2,5
17	3	98,28	3,9	-23,97	-14,7	0,033	67,2	2,1
18	3	97,75	4,9	-22,47	-19,2	0,021	64,1	1,8

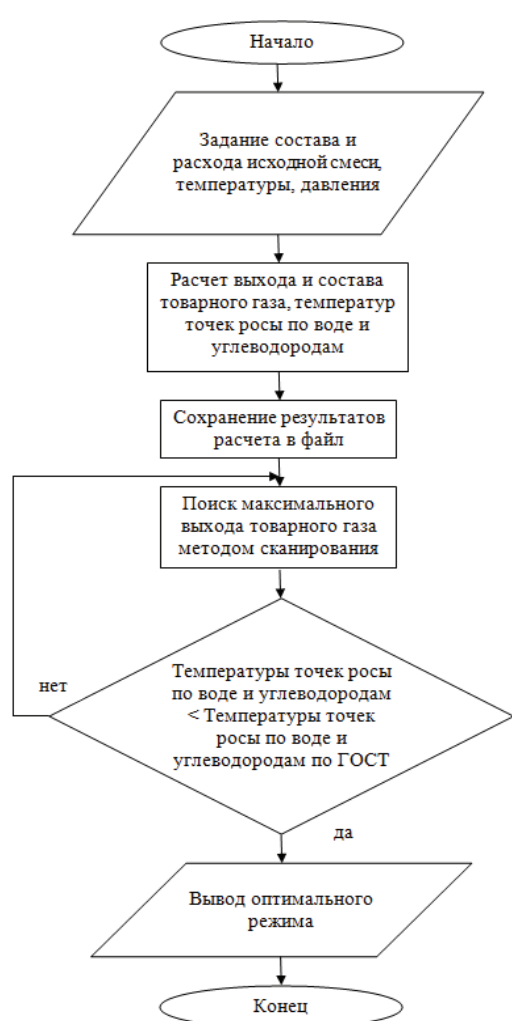


Рис. 2. Блок-схема алгоритма метода оптимизации

Для решения задачи поиска экстремума был применен метод сканирования [7], алгоритм которого заключается в последовательном просмотре значений критерия оптимальности в ряде точек, принадлежащих области изменения непрерывных переменных и нахождения среди них такой, в которой критерий имеет максимальное значение. Для произвольного числа переменных шаг по каждой следующей переменной производится после того, как завершен поиск по предыдущей переменной. Алгоритм метода оптимизации приведен на рис. 2. Программа расчета реализована в интегрированной среде Delphi.

Для расчета по оптимизационному модулю на основании результатов расчетов по МС формируется файл исходных данных, который включает значения термобарических параметров в аппаратах, выход товарного газа, значения температур точек росы по углеводородам и воде.

Пример вывода результатов расчета оптимального технологического режима представлен на рис. 3.

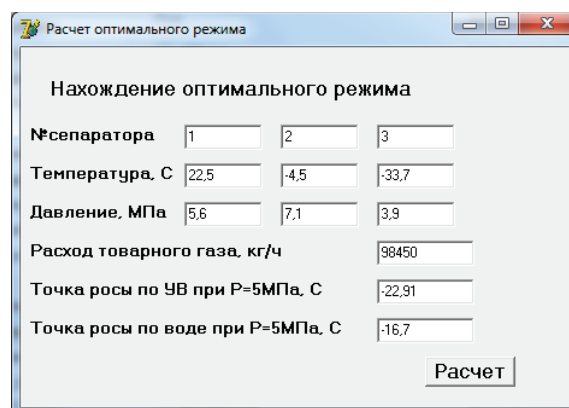


Рис. 3. Окно выдачи результатов расчета

Результаты исследований показали, что оптимальным режимом является 6 вариант (табл. 4), который соответствует максимальному выходу товарного газа (98450 кг/ч) при выполнении требований ГОСТ по качеству его подготовки.

Таким образом, разработанный модуль оптимизации МС позволяет автоматизировать процесс

выбора наиболее эффективного технологического режима работы установки промышленной подготовки газового конденсата, а модернизированная МС дает возможность оперативного расчета и прогнозирования технологических показателей работы УКПГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология переработки природного газа и конденсата / под ред. В.И. Мурина. – М.: ООО «Недра Бизнесцентр», 2002. – Ч. 1. – 517 с.
2. Сергеев О.А., Князев А.С., Кравцов А.В., Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Кузьменко Е.А., Рыжакина А.Н. Моделирование процессов отделения водометанольных растворов при промышленной подготовке газового конденсата // Газовая промышленность. – 2008. – № 4. – С. 24–27.
3. Кравцов А.В., Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Кузьменко Е.А., Рейзлин В.И., Гавриков А.А. Информационно-моделирующая система процессов промышленной подготовки газа и газового конденсата // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 132–137.
4. Кравцов А.В., Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Кузьменко Е.А., Ануфриева О.В. Анализ влияния технологических параметров и оптимизация процессов низкотемпературной сепарации // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 3. – С. 57–60.
5. Тронов В.П. Промысловая подготовка нефти. – Казань: ФЭН, 2000. – 417 с.
6. Баталин О.Ю., Брусиловский А.И., Захаров М.Ю. Фазовые равновесия в системах природных углеводородов. – М.: Недра, 1992. – 272 с.
7. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 416 с.

Поступила 26. 06. 2012 г.

УДК 004.415.2:533.9

АНАЛИЗ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ФОРМЫ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА ТОКАМАКА КТМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

А.М. Ли, А.А. Саньков, В.М. Павлов, А.С. Абанькин

Томский политехнический университет
E-mail: alee@tpu.ru

Приведен анализ алгоритма расчета формы плазменного шнура на предмет параллельных вычислений, получены оценки показателей эффективности параллельного алгоритма и необходимого числа процессоров для достижения максимального быстродействия расчета формы плазмы токамака КТМ. На основе полученных значений показателей эффективности сформулировано требование по вычислительной производительности многопроцессорной системы, необходимой для расчета формы плазмы и управления плазмой в реальном масштабе времени. По результатам работы произведен выбор многопроцессорного DSP кластера, который будет использован в контуре управления плазмой.

Ключевые слова:

Токамак, плазменный шнур, реконструкция формы, метод токовых нитей, параллельные вычисления.

Key words:

Tokamak, plasma column, shape identification, filament current method, parallel computing.

Эффективное и безопасное проведение экспериментов на современных установках типа токамак [1] невозможно без точного управления положением и формой плазменного шнура. Для Казахского материаловедческого токамака КТМ задача управления положением и формой плазмы особенно актуальна в связи с тем, что установка предназначена для создания специальных плазменных конфигураций (лимитерной, диверторной, с различными параметрами вытянутости и треугольности), обеспечивающих требуемые уровни энергетических воздействий на внутрикамерные элементы КТМ [2].

Высокие скорости протекания физических процессов в плазме токамаков требуют использования в контуре управления плазмой высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем, позволяющих эффективно распараллеливать алгоритмы управления и идентификации границы плазмы в реальном масштабе времени. В частности на токамаке JT-60 в контуре управления плазмой используется многопроцессорный DSP кластер [3], который позволяет визуализировать положение и форму плазмы в реальном масштабе времени.

Для восстановления границы плазмы и ее положения используют результаты измерений сигнала

лов с датчиков электромагнитной диагностики токамака [4, 5]. В состав электромагнитной диагностики токамака КТМ [6, 7] входят 36 двухкомпонентных магнитных зондов для измерения тангенциальной и нормальной составляющей полоидального магнитного поля, 12 датчиков для измерения полоидального потока, ток плазмы измеряется с использованием поясов Роговского.

В физике токамаков широко используется цилиндрическая система координат (r, φ, z) , а также вводится допущение об осевой (тороидальной) симметрии, что позволяет рассматривать задачу равновесия плазмы в токамаках на полоидальной плоскости (r, z) . Точку на полоидальной плоскости будем описывать радиус-вектором $\mathbf{r}=(r, z)$.

Одним из наиболее часто используемых методов оценки границы плазмы в режиме реального времени является метод токовых нитей (метод филаментов) [8]. Данный метод основан на вычислении функции распределения полоидального магнитного потока $\psi(\mathbf{r})$ путем аппроксимации плотности тока плазмы $J_p(\mathbf{r})$ конечным числом n_f токовых нитей:

$$J_p(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{n_f} I_{f_i} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{f_i}), \quad (1)$$

где $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{f_i})$ – дельта-функция Дирака.

Положение \mathbf{r}_{f_i} и величина тока I_{f_i} нитей находится таким образом, чтобы восстановленная функция магнитного потока согласовывалась с результатами магнитных измерений по критерию наименьших квадратов. На практике часто поиск границы плазмы осуществляют либо при фиксированных положениях токовых нитей (метод фиксированных нитей), либо при фиксированных токах в нитях (метод подвижных нитей). В [9] предлагается модифицированный метод фиксированных нитей, когда на положение токовых нитей накладывают ряд ограничений, при которых нити располагаются вдоль замкнутого контура – эллипса, положение фокусов которого оценивается по результатам магнитных измерений с использованием моментов плотности тока, малая полуось эллипса определяется как наименьшее расстояние между лимитером и любым из фокусов.

Следуя [9], расположим токовые нити вдоль контура $l(\mathbf{r}_c, a, b, \gamma)$, т. е. $\mathbf{r}_{f_i} \in l(\mathbf{r}_c, a, b, \gamma)$, где a, b, γ – неизвестные параметры, отвечающие за вытянутость и треугольность контура. В качестве $l(\mathbf{r}_c, a, b, \gamma)$ выбран контур, заданный в параметрической форме:

$$\begin{cases} r(t) = r_c + a \cos(t + \gamma \sin t), \\ z(t) = z_c + b \sin t, \quad t \in [0, 2\pi]. \end{cases}$$

Характеристики распределения тока (1) $\mathbf{r}_c, a, b, \gamma$ и I_{f_i} можно найти, минимизируя квадратичную ошибку:

$$\varepsilon(\xi) = \sum_i w_i (M_i(\xi) - \tilde{M}_i)^2, \quad (2)$$

где w – вектор весовых коэффициентов; ξ – вектор искоемых параметров; \tilde{M} – вектор, заданный в про-

странстве наблюдений, компоненты которого составляют измеренные значения характеристик полоидального магнитного поля $\tilde{\psi}, (\tilde{B}_n, \tilde{B}_t)$ и ток плазмы \tilde{I}_p ; $M(\xi)$ – вектор теоретических значений $(B_n, B_t), \psi$ и I_p . Поиск минимума (2) осуществляется по методу градиентного спуска за фиксированное число итераций N .

Для начального приближения, координаты центра плазменного шнура можно оценить, используя моменты плотности тока, определяемые выражением [10, 11]:

$$Y_m = \mu_0 \int_S f_m J_p dS = \oint_L (f_m B_\tau + r g_m B_n) dl, \quad (3)$$

где f_m и g_m – функции, удовлетворяющие однородному уравнению Грэда–Шафранова и уравнению Лапласа соответственно [8]. Для оценки токового центра плазменного шнура можно ограничиться вычислениями моментов плотности тока до второго порядка включительно, а в качестве f_m и g_m можно выбрать следующий набор функций [9, 12]:

$$\begin{cases} f_0 = 1, & g_0 = 0, \\ f_1 = z, & g_1 = -\ln(r), \\ f_2 = r^2, & g_2 = 2z. \end{cases}$$

Координаты токового центра плазмы можно оценить по следующим формулам:

$$r_c = \sqrt{\frac{Y_2}{Y_0}} = \sqrt{\frac{Y_2}{\mu_0 I_p}}, \quad z_c = \frac{Y_1}{Y_0} = \frac{Y_1}{\mu_0 I_p}.$$

Полоидальное магнитное поле $\mathbf{B}_p(\mathbf{r})$ и поток $\psi(\mathbf{r})$ определяются тороидальным током в токамаке, которое задается распределением тока плазмы (1) и тока в обмотках полоидального поля:

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = J_p(\mathbf{r}) + J_{ext}(\mathbf{r}), \quad (4)$$

Распределение тока в обмотках полоидального поля может быть задано аналогично (1):

$$J_{ext}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{n_{ext}} I_{ext_i} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{ext_i}), \quad (5)$$

здесь \mathbf{r}_{ext_i} – координаты обмоток на полоидальной плоскости; I_{ext_i} – ток в обмотках. В ходе эксперимента ток в обмотках измеряется поясами Роговского.

Принимая во внимание (1), (4) и (5), значение функции полоидального потока в точке наблюдения \mathbf{r}_k определяется с использованием функции Грина $G(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}')$ как суперпозиция потоков, создаваемых каждым током:

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{r}_k) &= \int_S G(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}') J(\mathbf{r}') dS' = \sum_{i=1}^{n_f} G(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_{f_i}) I_{f_i} + \\ &+ \sum_{j=1}^{n_{ext}} G(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_{ext_j}) I_{ext_j} = \sum_{i=1}^{n_f+n_{ext}} G_{ki} I_i. \end{aligned} \quad (6)$$

Явный вид функций Грина можно найти в [4]. Компоненты полоидального магнитного поля, в свою очередь, можно определить, используя выражения:

$$\begin{cases} B_r(\mathbf{r}_k) = \frac{1}{r_k} \frac{\partial \psi(\mathbf{r}_k)}{\partial z} = \sum_{i=1}^{n_f+n_{ext}} D_{r,ki} I_i \\ B_z(\mathbf{r}_k) = -\frac{1}{r_k} \frac{\partial \psi(\mathbf{r}_k)}{\partial r} = \sum_{i=1}^{n_f+n_{ext}} D_{z,ki} I_i \end{cases} \quad (7)$$

Задача оценки параметров ξ распределения тока плазмы, заданного выражением (1), в алгоритме восстановления формы плазмы является наиболее трудоемкой с точки зрения затрат времени на выполнение, поэтому ограничимся рассмотрением лишь описанного участка алгоритма. Отметим лишь, что определение самой границы плазмы сводится к идентификации плазменного режима (дивергентная либо лимитерная плазма) и определению величины потока ψ_B на границе плазмы, что позволит с использованием выражения (6) восстановить форму плазмы (более подробно см. в [5]).

Анализ описанного выше алгоритма на предмет параллельных вычислений проводился с использованием модели, построенной на ациклическом ориентированном графе «операции-операнды» $G=(V,R)$ [13, 14]. Через $V=\{1,2,\dots,|V|\}$ обозначено множество вершин графа, представляющее операции алгоритма, через R – множество всех дуг графа, причем дуга $(i,j) \in R$ показывает, что операция, относящаяся к вершине j , использует результат операции, относящейся к вершине i . За время выполнения любых операций принималась одна условная единица времени, кроме того, использовалось допущение, что все процессоры в вычислительной системе имеют общую разделяемую память, что позволило пренебречь затратами времени на передачу данных между вычислительными устройствами. Показатели эффективности параллельного алгоритма определяют в терминах ускорения $S_p(n)$ (8) и эффективности использования процессоров $E_p(n)$ (9) [14]:

$$S_p(n) = \frac{T_1(n)}{T_p(n)}, \quad (8)$$

$$E_p(n) = \frac{S_p(n)}{p}, \quad (9)$$

где $T_1(n)$ – время выполнения алгоритма на одном процессоре, $T_p(n)$ – время выполнения алгоритма на p процессорах (p – целое положительное число), величина n параметризует вычислительную сложность решаемой задачи, в качестве n можно принять объем входных данных. Так как решение задачи требуется осуществлять в режиме реального времени, приоритетным является показатель $S_p(n)$, а $E_p(n)$ приведен для полноты картины. Для оценки (8) и (9) можно принять $T_1=|V|$, в случае неограниченной вычислительной мощности $T_p=d(I)$, где $d(I)$ – диаметр (длина максимального пути) графа [14].

Нетрудно заметить, что расчет выражений (2), (3), (6) и (7) сводятся к типовым матричным вычислениям, в частности, умножению матрицы на вектор. Известен ряд публикаций (см., например,

[13, 14]), в которых подробно рассмотрены способы распараллеливания типовых вычислительных задач и приведены оценки показателей эффективности параллельных алгоритмов, а также число процессоров и топология связей между процессорами, необходимые для достижения максимально-го быстродействия решения задачи.

Так как алгоритм является неоднородным, т. е. разные участки алгоритма характеризуются разным ускорением и числом процессоров, то удобнее показатели эффективности (8) и (9) параллельного алгоритма характеризовать средними значениями ускорения и эффективности использования процессоров вычислительной системы:

$$\bar{S}_p = \frac{\sum_{i=1}^q T_{1,i} + N \sum_{j=q+1}^h T_{1,j}}{\sum_{i=1}^q T_{p,i} + N \sum_{j=q+1}^h T_{p,j}}, \quad \bar{E}_p = \frac{\bar{S}_p}{P},$$

где $T_{1,i}$, $T_{p,i}$ – время вычисления i -го участка алгоритма на одном процессоре и p процессорах соответственно, здесь учтено, что часть вычислений укладывается в итерационную процедуру поиска минимума квадратичной ошибки (2), которая повторяется N раз. Для достижения максимального быстродействия выполнения алгоритма необходимое число процессоров P можно определить из условия:

$$P = \max\{p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_h\},$$

где p_k – число процессоров, необходимое для достижения максимального быстродействия вычислений на k -м участке алгоритма.

Для токамака КТМ были получены следующие значения \bar{S}_p , \bar{E}_p и P :

$$\bar{S}_p = 2400; \quad \bar{E}_p = 0,3; \quad P = 7600. \quad (10)$$

Оценки были получены с учетом того, что в состав электромагнитной системы токамака КТМ входят $n_{ext}=7$ катушек полоидального поля, плазма аппроксимируется $n_f=7$ числом токовых нитей, поиск минимума (2) осуществляется за $N=5$ итераций.

Долю последовательных вычислений в алгоритме из общего числа вычислений можно определить как величину обратную ускорению (см. (8)), применим закон Амдала для рассматриваемого алгоритма с учетом (10):

$$S(p) = \frac{1}{\bar{S}_p^{-1} + (1 - \bar{S}_p^{-1})/p} \Big|_{p \ll P, \bar{S}_p^{-1} \ll 1} \approx p. \quad (11)$$

Из (11) видно, что при малом числе процессоров ускорение будет приблизительно равно числу процессоров p . Такую зависимость можно объяснить тем, что значительная часть вычислений из общего числа может быть проведена независимо на каждом процессоре, (применяя, например, метод каскадного суммирования числовых последовательностей на p вычислителях).

Приведем оценку мощности вычислительной системы. Время цикла τ управления положением и формой плазмы имеет порядок 1 мс, общее число операций с плавающей точкой в алгоритме можно оценить как T_1 (применительно к токамаку КТМ T_1 имеет порядок 10^6), тогда производительность вычислительной системы можно оценить как:

$$F > \frac{T_1}{\tau} = 1 \text{ Гфлопс.} \quad (12)$$

Оценки (11) и (12) позволяют сформулировать одно из требований при выборе конкретного многопроцессорного вычислительного устройства — число процессоров и вычислительную мощность.

Для управления плазмой в токамаке КТМ выбрана восьмипроцессорная TigerSHARC® DSP VME карта TS-V39, которая состоит из двух кластеров, по четыре DSP процессора ADSP-TS101 в каждом с разделяемой памятью. Вычислительная производительность TS-V39 составляет 12 Гфлопс. Ключевой особенностью карты TS-V39 является топология связей между DSP процессорами в кластере,

которая позволяет организовать высокоскоростную связь между процессорами — полный граф.

Дальнейшая работа будет сосредоточена на оптимизации алгоритма восстановления формы плазменного шнура под архитектуру вычислительной системы TS-V39 и разработке соответствующего программного обеспечения.

Выводы

Проведен анализ алгоритма восстановления формы и положения плазменного шнура токамака КТМ, показана высокая степень параллелизма алгоритма, получены оценки его эффективности и требуемой производительности вычислительной системы. Произведен выбор VME карты с DSP кластерами для контура управления плазмой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по государственному контракту № 07.514.11.4069 от 12.10.2011 г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wesson J. Tokamaks. — Oxford: Clarendon Press, 2004. — 749 p.
2. Азизов Э.А., Велихов Е.П., Тажибаева И.Л. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы управляемого термоядерного синтеза / под ред. акад. Е.П. Велихова. — Алматы: Национальный ядерный центр РК, 2006. — 236 с.
3. Kimura T., Kurihara K., Kawamata Y., Akiba K., Adachi H. DSP application to fast parallel processing in JT-60U plasma control // 18th Symposium on Fusion Technology. — Karlsruhe, Germany, 1994. — P. 691–694.
4. Ariola M., Pironti A. Magnetic control of tokamak plasmas. — London: Springer-Verlag, 2008. — P. 161.
5. Beghi A., Cenedese A. Advances in real-time plasma boundary reconstruction // IEEE Control Syst. Mag. — 2005. — V. 25. — № 5. — P. 44–64.
6. Обходский А.В., Байструков К.И., Павлов В.М., Меркулов С.В., Голобоков Ю.Н. Система измерения электромагнитных параметров для электрофизической установки ТОКАМАК КТМ // Приборы и техника эксперимента. — 2008. — № 6. — С. 23–28.
7. Обходский А.В. Разработка системы измерения электромагнитных параметров материаловедческого токамака КТМ: дис.... канд. тех. наук. — Томск, 2010. — 160 с.
8. Swain D.W., Neilson G.H. An efficient technique for magnetic analysis of noncircular, high-beta tokamak equilibria // Nucl. Fusion. — 1982. — V. 22. — № 8. — P. 1015–1030.
9. Vasiliev V.I., Kostsov Yu.A., Lobanov K.M., Makarova L.P., Mineev A.B., Gusev V.K., Levin R.G., Petrov Yu.V., Sakharov N.V. On-line plasma shape reconstruction algorithm in tokamaks and its verification in the Globus-M // Nucl. Fusion. — 2006. — V. 46. — № 8. — P. 625–628.
10. Захаров Л.Е., Шафранов В.Д. Равновесие плазмы с током в тороидальных системах // Вопросы теории плазмы. — 1982. — Вып. 11. — С. 118–233.
11. Shkarofsky P. Evaluation of multipole moments over the current density in a tokamak with magnetic probes // Phys. Fluids. — 1982. — V. 25. — № 1. — P. 89–96.
12. Van Milligen B.Ph. Exact relations between multipole moments of the flux and moments of the toroidal current density in tokamaks // Nucl. Fusion. — 1990. — V. 30. — № 1. — P. 157–160.
13. Bertsekas D.P., Tsitsiklis J.N. Parallel and Distributed Computation. Numerical Methods. — New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989. — 108 p.
14. Гергель В.П., Стронгин, Р.Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем. — Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2003. — 184 с.

Поступила 04.05.2012 г.

УДК 004.9:622.276

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ OMSD ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ

В.А. Силич, В.З. Ямпольский, А.О. Савельев, В.П. Комагоров, А.А. Алексеев, С.А. Гребенщиков

Томский политехнический университет
E-mail: sava@tpu.ru

Рассматриваются планирование геолого-технических мероприятий и результаты анализа существующих программных средств поддержки данного процесса. Предлагается использование методологии OMSD для формирования моделей предметной области с целью последующего проектирования системы поддержки принятия решений.

Ключевые слова:

Проектирование систем, геолого-техническое мероприятие, система поддержки принятия решений.

Key words:

Information system design, well intervention, decision support system.

Введение

Основным инструментом стабилизации уровня добычи и повышения эффективности разработки нефтяного промысла является проведение большого объема геолого-технических мероприятий (ГТМ). В качестве целей проведения подобных мероприятий выступают: повышение коэффициента эксплуатации нефтяных скважин (относительная длительность работы скважины), поддержание базовой добычи нефти, интенсификация добычи нефти, повышение нефтеотдачи пласта [1].

С увеличением фонда скважин возрастает роль геолого-технических мероприятий, в первую очередь, обработки призабойной зоны, оптимизации технологических режимов работы скважин, регулирования давления нагнетания воды по пластам и пачкам, раздельного и очагового заводнения. В ряде случаев дополнительная добыча нефти на один скважино-месяц, отработанный после геолого-технических мероприятий, сопоставима или превышает добычу по скважинам, пробуренным в стадии высокой обводненности [2].

Целесообразность и возможность проведения ГТМ зависят от технических возможностей и общего состояния скважины, определяемого при помощи проведения гидродинамических исследований. Лишь в редких случаях ситуация складывается таким образом, когда имеется только один вид мероприятия, который может быть проведен в данных условиях.

Задачами, решаемыми в рамках планирования мероприятий, являются: определение цели проведения, выбор технологии воздействия на скважину, подбор требуемых ресурсов. На всех этапах планирования осуществляются оперативный контроль и мониторинг.

В общем виде задачу выбора оптимальной последовательности проведения геолого-технических мероприятий можно представить следующим образом. Имеется $G=\{G_n\}$ – множество технологий проведения мероприятий, из которых необходимо осуществить выбор; $R=\{R_k\}$ – множество геолого-

технических параметров, определяющих условия эксплуатации скважины; $C=\{C_m\}$ – множество условий и критериев, согласно которым должен осуществляться выбор мероприятия. Необходимо выбрать технологию $G_n \in G$, наиболее целесообразную для проведения на скважине, руководствуясь значениями параметров $R_k \in R$ и оценками соответствия технологий условиям и критериям $C_m \in C$ [3].

В данной статье рассматриваются программные решения, используемые в процессах планирования, и предлагается подход к проектированию системы поддержки принятия решений при выборе ГТМ для нефтедобывающей скважины.

Процесс планирования геолого-технических мероприятий

При анализе предметной области, на основе регламентной и нормативной документации, а также работ других авторов, была выделена последовательность этапов процесса планирования геолого-технических мероприятий [4]:

- Выявление скважины с недоиспользованным потенциалом.
- Прогнозирование добычи после технологической оптимизации и воздействия на скважину. Потенциал добычи определяется как максимально возможный при определенных условиях и ограничениях, добычи скважины и пласта в целом.
- Формирование последовательности проводимых мероприятий. Осуществляется выбор мероприятий по увеличению охвата и добычи для выбранных ранее проблемных зон выработки, а также расчет технологической и экономической эффективности.
- Реализация. Выполняется комплекс подобранных мероприятий.
- Анализ эффективности проведенного мероприятия. Рассчитывается фактический эффект, строятся и анализируются графики, определяются основные проблемы и варианты их решений.

Степень автоматизации каждого из этапов зависит от оснащенности предприятия и используемых программных средств.

Анализ существующих решений

В рамках проводимых исследований были проанализированы следующие средства информационного сопровождения процессов планирования мероприятий, используемые на нефтедобывающих промыслах:

1. WellFlo. Программное обеспечение международной компании WetherFord для проектирования, моделирования и выявления неисправностей нефтедобывающих скважин. Программой моделируется поведение жидкости в коллекторе, колонне и наземном трубопроводе [5].
2. GTMDB. Проект компании OT-OIL, ориентированный на информационное сопровождение процессов планирования воздействий на скважину: сбор и хранение исходных данных, снижение времени и затрат на подготовку регламентной отчетности, ведение истории проводимых мероприятий. Основой решения служит платформа Атолл [6].
3. Атолл. Решение ориентировано на автоматизацию учетных, инженерных и системных задач при планировании, мониторинге и анализе геолого-технических мероприятий. Приложение рассматривается как инструмент поддержки вышеуказанных процессов, выполняемых непрерывно и циклично [7].
4. Баспро Оптима. Программный комплекс, ориентированный на использование специалистами производственных служб и аналитических центров нефтяных компаний. Комплекс обеспечивает формирование модели данных, инструменты анализа показателей разработки и интеграцию со сторонними решениями [8].
5. OilInfoSistem (OIS). Комплексная система управления данными нефтедобывающего предприятия, разработана ЗАО «НижневартовскА-СУпроект». Программное обеспечение, являющееся частью OIS, обеспечивает учет добычи нефти и газа, анализ работы фонда скважин, построение карт контроля разработки месторождений, учет и анализ работы промысловых трубопроводов [9].
6. tNavigator. Разработка российской компании «Rock Flow Dynamics». Представляет собой параллельный интерактивный комплекс гидродинамического моделирования. Позволяет рассчитывать композитную модель и модель «нелетучей нефти», хранить данные моделей, оценивать эффективность гидродинамического разрыва пласта [10].

На основе анализа функций указанных решений и экспертных оценок можно разделить представленные решения на три типа в зависимости от этапов планирования ГТМ, на которых они используются:

- На этапах выявления скважины с недоиспользованным потенциалом и прогнозирования добычи используются решения, направленные на сопровождение процесса планирования мероприятий, т. е. сбор и консолидацию данных, повышение доступности требуемой информации для лиц, принимающих решения, начиная от геологов и технологов, заканчивая менеджерами старшего звена (GTMDB, Атолл).
- Решения, используемые на этапах формирования последовательности и осуществления мероприятий и предоставляющие инструментальные средства для расчета технологических параметров. Основными пользователями являются промысловые геологи и технологи, использующие эти решения в качестве дополнительного вспомогательного инструмента при прогнозировании показателей и планировании технологических параметров определенного вида ГТМ (WellFlo, tNavigator).
- Все этапы планирования поддерживают решения Баспро Оптима и OIS, при этом не поддерживается формирование первичного списка скважин-кандидатов.

Каждое из указанных программных средств может быть использовано в качестве вспомогательного при выборе типа геолого-технического мероприятия для нефтедобывающей скважины, но ни одно из них не содержит алгоритмов и инструментальных средств, обеспечивающих формирование первичного списка скважин-кандидатов и анализ эффективности ряда альтернатив. Разрабатывается решение, ликвидирующее указанные недостатки, на основе наиболее эффективной объектно-ориентированной методологии проектирования информационных систем.

Применение методологии OMSD для построения моделей предметной области – планирования геолого-технических мероприятий

Для создания крупных информационных систем требуется совместное использование объектно-ориентированного анализа и проектирования и методологии системного анализа, к числу таких методологий относится OMSD.

OMSD (*Object Model for System Design*) – методология, в основе которой лежит объектно-ориентированный подход моделирования, главной особенностью которого является возможность объединять различные методики системного анализа и инженерии знаний на базе декларативной модели, формируемой с использованием экспертных знаний, описывающих типовые свойства, структуры и закономерности отдельных классов систем [11].

Согласно методологии OMSD классы определяют типы используемых объектов, которые, в свою очередь, являются структурированным описанием компоненты системы.

В ходе работ были выделены следующие классы системы планирования ГТМ:

- **ГТМ.** Характеризует тип проводимого мероприятия (рис. 1). Методы класса отражают воздействие на скважину и пласт, оказываемое в ходе проведения мероприятия.
- **Ресурс.** Класс, каждый экземпляр наследников которого характеризует одну из необходимых для проведения ГТМ компонент (оборудование, бригаду рабочих, реагенты).
- **Эффективность (технологическая и экономическая).** Класс, используемый при оценке эффекта от проведенного мероприятия.
- **Скважина.** Класс содержит характеристики пласта, притока и скважины. Экземпляр класса отражает текущее состояние определенной нефтескважины.
- **Решение о проведении.** Класс является отображением выбранной в процессе планирования альтернативы, то есть принятого решения. Помимо прочих содержит множественный атрибут Ресурсы, являющийся коллекцией экземпляров класса Ресурс. Для целей анализа на основе описанных классов были сформированы мультиобъекты – множество объектов одного класса, выделенных в соответствии со специальным атрибутом, принимающим дискретные значения [11]. В частности, для анализа эффективности принятого решения о проведении гидроразрыва пласта (ГРП), сформированы мультиобъекты классов *Экономическая эффективность* и *Технологическая эффективность* (таблица), в соответствии со значением атрибута *Статус*.

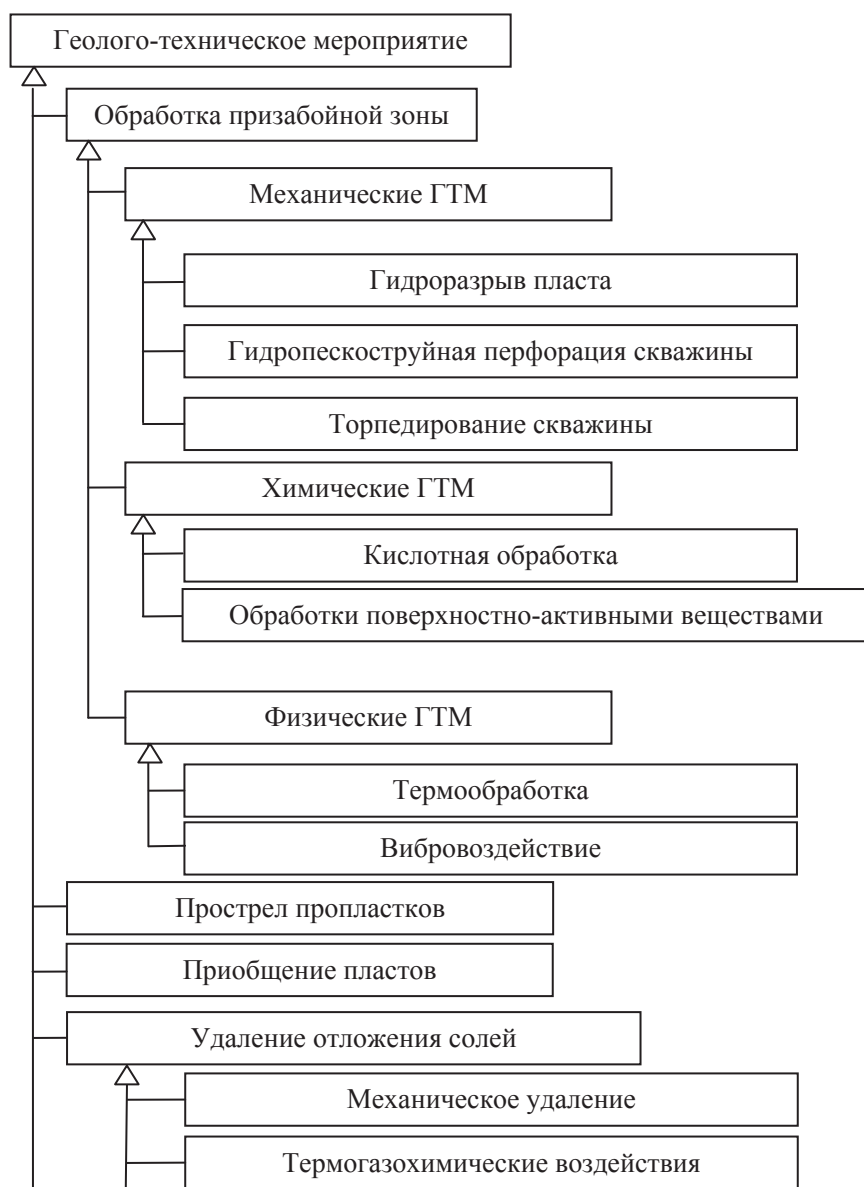


Рис. 1. Фрагмент иерархии классов геолого-технических мероприятий

Таблица. Пример мультиобъектов для анализа а) экономической; б) технологической эффективности гидроразрыва пласта

Экономическая эффективность ГРП	Статус	
	План	Факт
Срок окупаемости, лет	0,10	0,11
Внутренняя норма рентабельности, %	73,3	70
.....		

а

Технологическая эффективность ГРП	Статус	
	План	Факт
Дебит после ГРП, т/сут	34,0	32,9
.....		

б

На основе выявленных классов была сформирована модель компонент системы планирования ГТМ – множество подсистем и элементов системы, связанных отношениями агрегации, присоединения и ассоциации, поясняющая связи между выделенными классами. Фрагмент модели компонент представлен на рис. 2.

Сформированные классы содержат методы, позволяющие применять их на каждом из этапов планирования проведения мероприятий:

- Класс Скважина, характеризующий текущее состояние определенной нефтедобывающей скважины, используется на этапе выявления скважины с недоиспользованным потенциалом.
- На этапе прогнозирования добычи после технологической оптимизации и проведения используются методы классов ГТМ, Скважина и Ресурс. Результатом является новый экземпляр класса Скважина, отражающий прогнозируемое значение характеристик исследуемой скважины.
- Класс Решение о проведении, консолидирующий все данные, касающиеся определенной скважины и рассматриваемого в качестве альтернативного решения мероприятия, применяется при формировании последовательности мероприятий.
- При реализации мероприятия используются классы Ресурс и ГТМ, экземпляры которых ха-

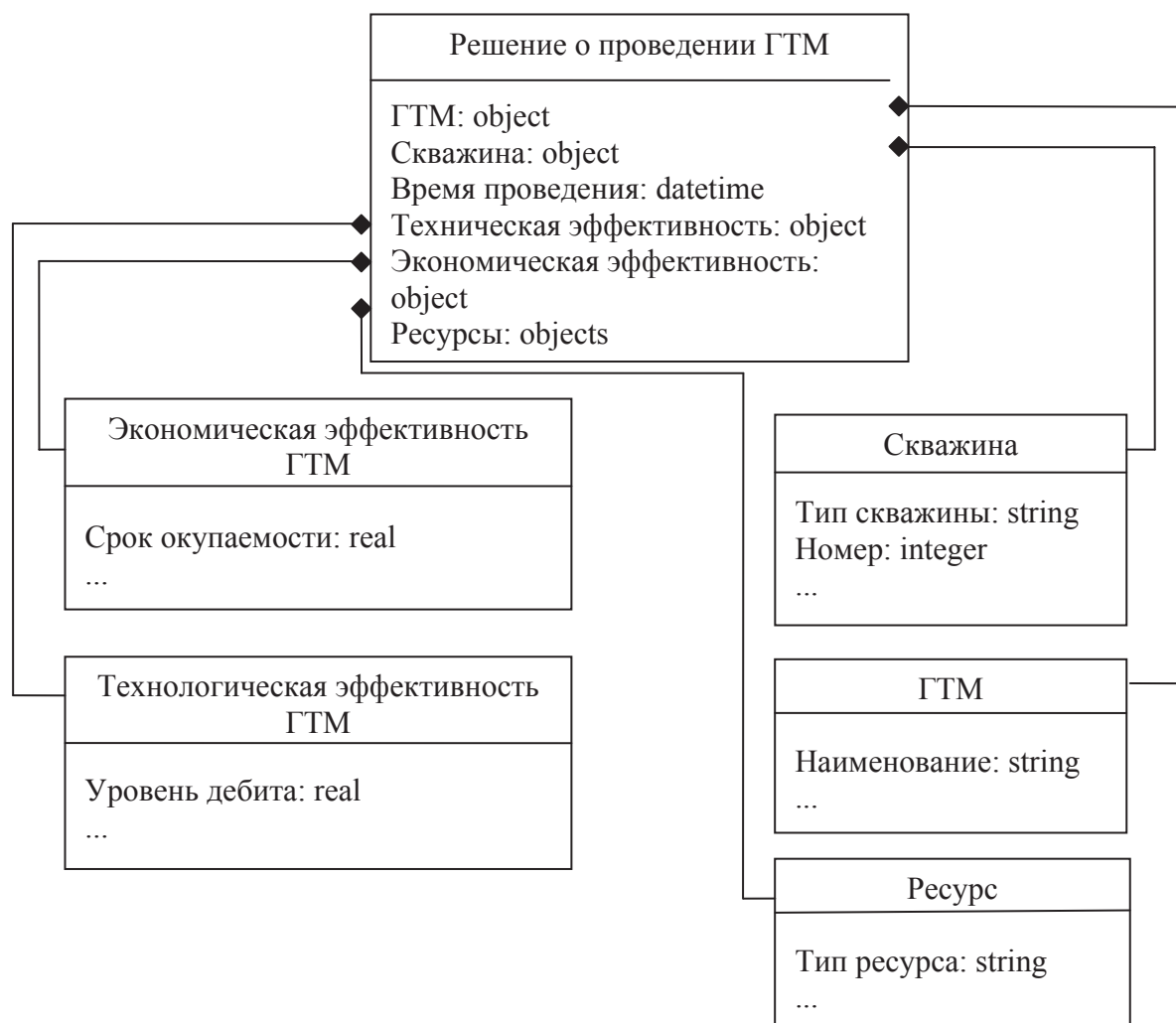


Рис. 2. Фрагмент модели компонент системы принятия решения при планировании геолого-технических мероприятий

рактически применяемую технологию и задействованные при этом средства.

- На этапе анализа эффективности, в первую очередь, используются экземпляры классов Экономическая эффективность и Технологическая эффективность, на основе методов которых формируются выводы об общей эффективности проведенных мероприятий.

Программная реализация выделенных классов обеспечивает информационную поддержку на всех этапах процесса планирования ГТМ. Сформированные на основе множеств экземпляров классов мультиобъекты используются при проектировании хранилищ данных для системы поддержки принятия решений при планировании мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уметбаев В.Г. Геолого-технические мероприятия при эксплуатации скважин. – М.: Недра, 1989. – 215 с.
2. Лозин Е.В. Эффективность доработки нефтяных месторождений. – Уфа: Башк. кн. изд-во, 1987. – 152 с.
3. Шагиахметов М.Р. Модели и комплекс программ многокритериального принятия решений в условиях неопределенности в нефтедобыче: дис.... канд. техн. наук. – Казань, 2004. – 160 с.
4. Тимонов А.В. Системный подход к выбору геолого-технических мероприятий для регулирования разработки нефтяных залежей: дис.... канд. техн. наук. – Уфа, 2010. – 151 с.
5. Программное обеспечение для нефтедобывающей отрасли WellFlo // Weatherford. 2012. URL: http://www.weatherford.ru/assets/files/pdf/6341_WellFlo-Software-A3_RU.pdf (дата обращения: 20.05.2012).
6. Разработка системы GTMDB // OT-OIL. 2012. URL: http://www.ot-oil.com/project_gtmdb.php (дата обращения: 20.05.2012).

Выводы

1. Систематизированы и выявлены этапы планирования геолого-технических мероприятий, предложена классификация программных решений, на основе методологии OMSD выполнено моделирование информационной системы планирования воздействий на нефтедобывающую скважину.
2. Сформированы модели классов, объектов и компонент для каждого из этапов планирования, что позволило обеспечить алгоритмическую и программную поддержку системы принятия решений при планировании работ нефтедобывающей отрасли.

Разработка системы осуществляется в рамках научно-учебной лаборатории «Виртуальный промысел» Института кибернетики ТПУ.

7. Концепция АТОЛЛ // OT-OIL. 2012. URL: http://www.ot-oil.com/atoll_konc.php (дата обращения: 20.05.2012).
8. БАСПРО Оптима // БАСПРО. 2011. URL: <http://www.baspro.ru/programm> (дата обращения: 20.05.2012).
9. Система OIS // OilInfoSystem. 2006. URL: <http://www.asuproject.ru/newOIS.php> (дата обращения: 20.05.2012).
10. Специфические модули tNavigator // Rock Flow Dynamics. 2011. URL: http://rfdyn.com/ru/technology/tnavigator_technology1/ (дата обращения: 20.05.2012).
11. Силич М.П. Информационная технология проектирования сложных социально-экономических систем на основе объектно-ориентированной методологии моделирования: дис.... д-ра техн. наук. – Томск, 2005. – 360 с.

Поступила 23.05.2012 г.

УДК 004.415.2

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТНЫМИ РАБОТАМИ ПРИ ОБУСТРОЙСТВЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

С.А. Гребенчиков, В.А. Силич, В.П. Комагоров, О.Б. Фофанов, А.О. Савельев

Томский политехнический университет

E-mail: kmno4@tpu.ru

Предлагается технология разработки системы поддержки принятия решений для управления проектными работами при обустройстве месторождений нефти и газа, основанная на объектно-ориентированной методологии моделирования систем, предполагающей последовательное формирование и использование для принятия решений моделей процесса разработки, проблемосодержащей и проблеморазрешающей систем.

Ключевые слова:

Информационные технологии, интеллектуальные системы, поддержка принятия решений, проектные работы, управление, разработка, методы.

Key words:

Information technologies, intellectual systems, decision-making support, design works, management, development, methods.

В условиях выхода из мирового финансового кризиса подавляющее большинство компаний стремится поддерживать рентабельность путем снижения текущих затрат, в том числе за счет рационализации процессов управления и планирования. Эти тенденции характерны также для организаций, осуществляющих работы по проектированию разработки и обустройства нефтяных и газовых месторождений [1].

Данный вид деятельности характеризуется масштабностью проектов, большим количеством вовлеченных участников, сложностью организации процессов, наличием различного рода процедур, норм и стандартов, в связи с чем требует детального планирования, организации и контроля выполнения. Для преуспевания в конкурентоспособной среде на проектную организацию возлагаются повышенные требования к срокам, качеству и стоимости выполнения работ. Особое значение при этом приобретает оптимальная организация внутренних технологических процессов, обеспечение необходимого уровня автоматизации и информатизации, накопление знаний и эффективное управление системой в целом [2, 3].

Актуальной задачей в области информационного обеспечения проектно-исследовательских работ при обустройстве месторождений нефти и газа является своевременная и эффективная поддержка принятия управленческих решений.

Недостаточная эффективность существующих методов и подходов к организации информационно-аналитического обеспечения и существенное усложнение процесса принятия решений в условиях нечеткости и неопределенности исходной информации вызывает необходимость создания адаптивных систем, обеспечивающих полнофункциональный процесс поддержки принятия решений для задач управления различного класса и сложности [4].

Для решения поставленной задачи применяется объектно-ориентированная технология системного анализа, предложенная в работе [5].

Основными моментами технологии являются:

- использование иерархического и объектно-ориентированного подходов в моделировании систем;
- использование типовой последовательности этапов, соответствующей общесистемной последовательности принятия решений;
- переход к итеративным схемам организации работ, позволяющим корректировать цели разработки и ранее принятые решения;
- интеграция различных методов моделирования, последовательное формирование совокупности связанных моделей, начиная от концептуальных представлений и заканчивая моделями реализации;
- применение интегрированных инструментальных средств, обеспечивающих объединение различных методов, используемых на разных этапах и разными участниками проекта, использование типовых моделей из библиотеки стандартных решений.

Особенностями управления проектными работами при обустройстве месторождений нефти и газа, определяющими необходимость формирования технологии разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений, снижающей затраты на производство и улучшающей качество будущей информационной системы, являются: сложность исходной проблематики и соответствующей проблеморазрешающей системы; слабая формализуемость обрабатываемой информации и используемых методов; уникальность (нетипичность) составляющих компонент системы. Исходя из этих особенностей, сформулированы требования, предъявляемые к информационной технологии:

- универсальность, высокая степень обобщенности;
- гибкость, простота адаптации, настройки на конкретный вид задач;
- наглядность и обзорность формируемой модели проблемосодержащей и проблеморазрешающей систем;

- использование при построении моделей опыта экспертов;
- открытость и интегрируемость инструментальных средств, возможность их расширения, а также сопряжения с другими приложениями, реализующими различные методики.

Для удовлетворения перечисленных требований предлагаются следующие принципы создания информационной технологии:

- декларативности: регламент должен предписывать вид декларативной модели, формируемой на каждой стадии, и совокупность методов, используемых для ее построения и принятия решений на модели;
- итеративности: схема применения этапов разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) должна быть итеративной, т. е. по типу спиральной или макетной схемы;
- иерархичности: разработка ИСППР должна осуществляться на разных уровнях абстрагирования с использованием иерархического подхода;
- типизации: при разработке ИСППР следует использовать типовые знания;
- комплексности: должна быть предусмотрена возможность сочетания, интегрирования разнообразных методов и процедур принятия решений и соответствующих программных компонент.

Согласно выбранной методологии, для достижения цели, применительно к разработке технологии ИСППР при обустройстве месторождений нефти и газа, необходимо решить следующие задачи:

- выявление требований к информационной технологии ИСППР;
- разработка принципов, лежащих в основе ИСППР;
- разработка объектно-ориентированной методологии моделирования предметной области ИСППР;
- разработка алгоритмов формирования объектно-ориентированной модели и поиска решений на модели для нахождения оптимальных скоординированных решений, обеспечивающих достижение целей ИСППР;
- разработка типового регламента процесса разработки ИСППР на основе объектно-ориентированной методологии моделирования;
- создание комплекса инструментальных средств поддержки информационной технологии ИСППР;
- использование информационных технологий для разработки ИСППР.

Обобщенная схема автоматизированной разработки ИСППР, основанная на предложенных принципах, приведена на рис. 1.

Далее, в соответствии с выбранной объектно-ориентированной методологией моделирования систем *OMSD* (*Object Model for System Design*), модель предметной области, формируемая в процессе

разработки системы, представляет собой совокупность моделей процесса разработки, проблемосодержащей и проблеморазрешающей систем. Модель любой из систем, в свою очередь, содержит множество взаимосвязанных моделей следующих видов: классов (*ClassModel*), объектов (*ObjectModel*), зависимостей атрибутов (*AttributeModel*), компонент (*ComponentModel*), координации (*CoordinateModel*) [5].

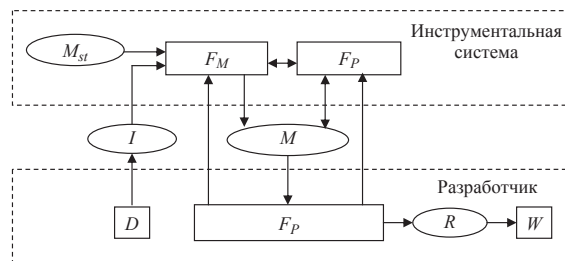


Рис. 1. Обобщенная схема разработки ИСППР: D – процедура сбора информации; W – процедура реализации решений; I – исходное описание; R – решение; M – модель предметной области; M_{st} – библиотека типовых моделей; F_M – процедура сбора информации; F_P – процедуры принятия решений

С целью планирования работ на подготовительном этапе формируется объектная модель процесса разработки. На рис. 2 представлен фрагмент модели компонент процесса, содержащий в качестве подсистем основные этапы и подэтапы. Выбор методов и моделей, используемых на каждой стадии процесса разработки ИСППР, и дальнейшее формирование алгоритмов осуществляется разработчиком на основе рекомендаций типового регламента.

На основе объектно-ориентированной методологии структуры, используемые для описания компонент системы, отражаются в модели классов в виде иерархии наследования. В объектной модели системы в виде объекта представляется любая компонента системы – сама система в целом, ее подсистемы и элементы, а также отношения. Объект представляет собой структурированное описание конкретной компоненты. Классы же определяют типы используемых объектов и задают соответствующие структуры описания.

Стоит отметить, что в отличие от традиционного объектно-ориентированного языка представления знаний, используемого для моделирования систем, в модели *OMSD* классы могут сопоставляться не только неделимым, но и любым компонентам системы (подсистемам, системе в целом), а также отношениям, связывающим компоненты друг с другом. В традиционном же подходе, классы используются лишь для описания объектов, рассматриваемых как неделимые сущности.

Кроме того, в модели классов *OMSD* в определение атрибутов класса включается не только их наименование и тип, но и область значений, что позволяет рассматривать классы не только как шаблоны описаний объектов, но и как обобщен-

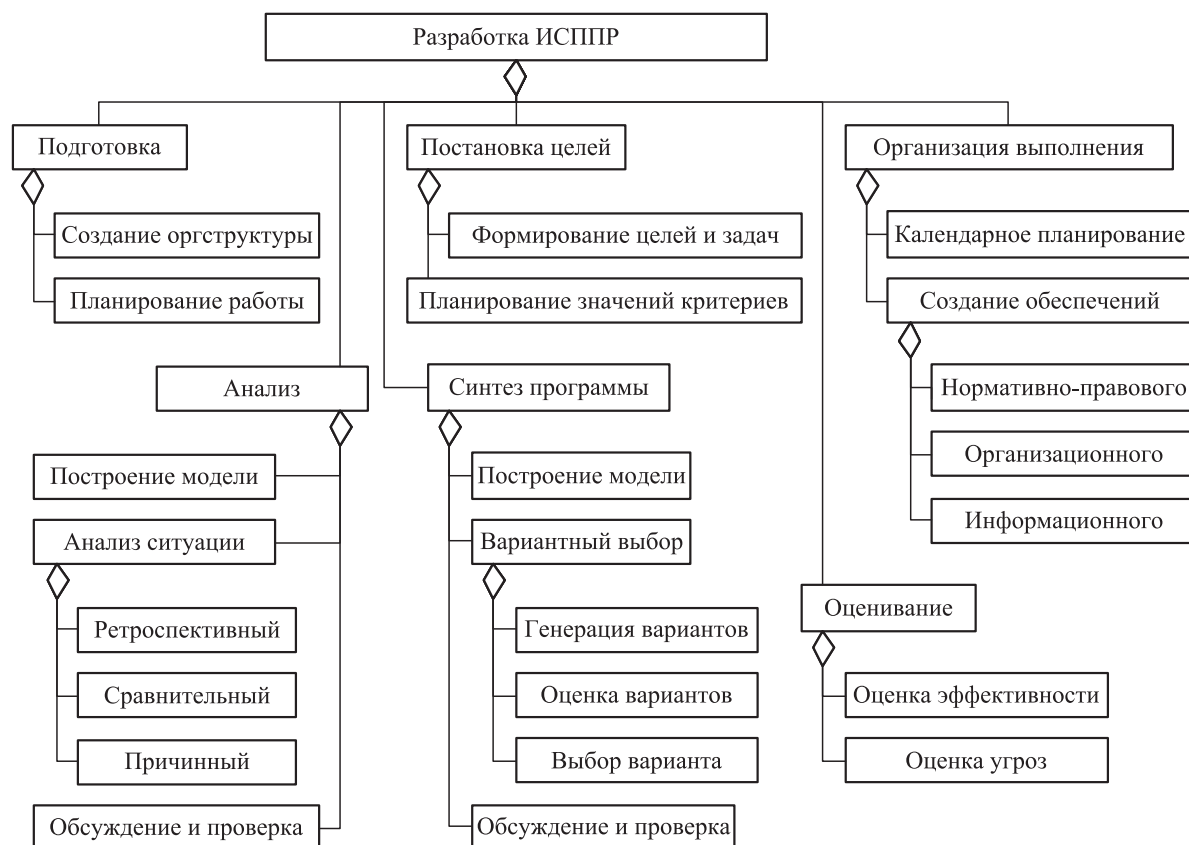


Рис. 2. Модель компонент процесса разработки ИСПП

ные описания множеств объектов одного класса (как аналоги фреймов общих понятий) [6].

В процессе анализа предметной области управления проектными работами при обустройстве месторождений были выявлены следующие классы системы:

План проектно-изыскательских работ (ПИР) – класс верхнего уровня, представляет собой совокупность проектов (договоров), объединенных по какому-либо общему признаку и распределенных по времени. Модель класса «План проектно-изыскательских работ» представлена на рис. 3.

Договоры (Проекты) – класс, включающий в себя структуры, используемые для описания договоров на проектно-изыскательские работы, их временной и стоимостной составляющей и прочих характеристик проектов, используемых в работе.

Работники – класс, описывающий производственный персонал.

Производственные задачи – основная единица ПИР. Включает в себя следующие параметры: работник, комплект (том), договор, состояние.

Комплекты ПСД (проектно-сметная документация) – класс, включающий в себя описание конечной единицы ПИР – документации, передаваемой заказчику по актам сдачи-приемки работ.

Трудозатраты – данный класс используется для калькуляции трудовых затрат персонала, отнесенных в процессе работы на конкретный договор.

На базе классов может быть создано множество объектов (реализаций классов). Для отображения множества вариантов реализации некоторого класса, например, множества состояний системы в различные моменты времени, в различных точках пространства, в различных условиях и т. д. вводится понятие мультиобъекта. Мультиобъект – множество объектов (набор реализаций) одного класса, выделенных в соответствии с некоторым признаком [5].

С целью выявления тенденций эффективности выполнения плана ПИР за последние 3 года был проведен анализ ключевых показателей. На основе введенных классов описаний компонентов были сформированы мультиобъекты по временному признаку, соответствующие 2010, 2011 и 2012 гг. Каждая из реализаций содержит конкретные значения атрибутов, полученные в заданном году. На рис. 4 приведен пример мультиобъекта для компонента «Выполнение плана ПИР». По результатам анализа был сделан вывод, что выполнение плана ПИР нестабильно и требует тщательного контроля и принятия эффективных управленческих решений.

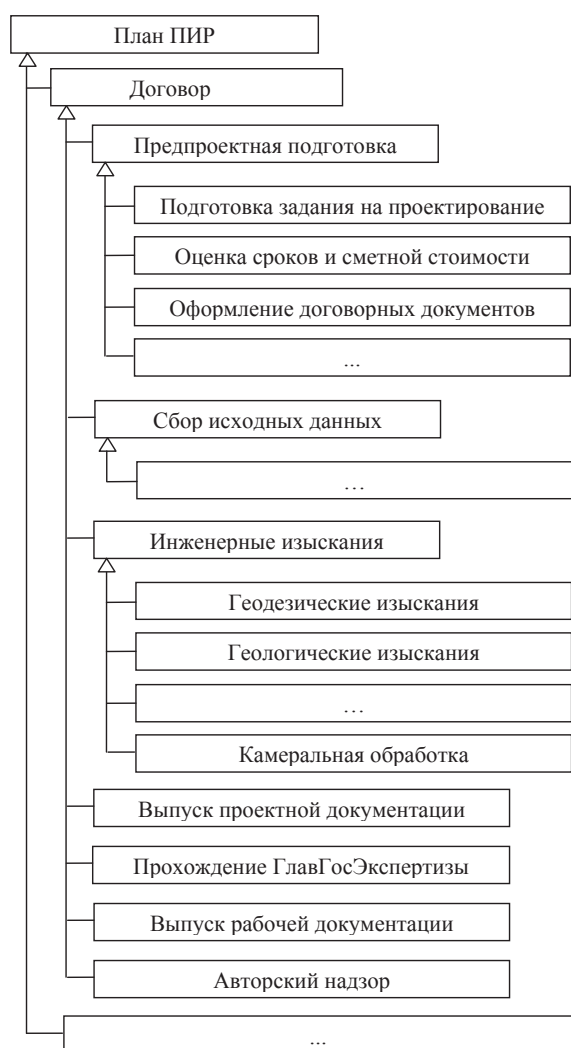


Рис. 3. Фрагмент иерархии класса «План проектно-исследовательских работ»

Модель компонент отражает структуру системы в виде дерева подсистем и элементов. Каждой

из компонент сопоставляется модель объектов, позволяющая рассматривать компоненту как некий целостный объект, описываемый набором характеристик (атрибутов) и выполняемых им действий (методов).

Множество подсистем $S=\{s_i\}$ объединяет такие компоненты, как: система в целом, рассматриваемая как «черный ящик» на верхнем уровне абстрагирования; подсистемы моделируемой системы и окружающей среды.

Подсистема может быть представлена в виде кортежа:

$$s_i = \langle n(s_i), c(s_i), M^O(c(s_i)), M^A(c(s_i)), \{M^K(c(s_i))\} \rangle,$$

где $n(s_i)$ – имя подсистемы; $c(s_i)$ – класс, на который ссылается подсистема (наследуется от базового класса «Подсистема»); $M^O(c(s_i))$ – модель объектов, сопоставленная подсистеме; $M^A(c(s_i))$ – модель зависимостей атрибутов, описывающих подсистему; $M^K(c(s_i))$ – координационная модель, сопоставленная подсистеме.

Обязательным является только имя подсистемы. Остальные составляющие описания подсистемы вводятся по мере необходимости [5].

Модель основных компонентов ИСППР по управлению проектными работами при обустройстве месторождений нефти и газа представлена на рис. 5.

Разработанные на основе объектно-ориентированной технологии модели в дальнейшем используются при создании программного обеспечения ИСППР. Реализация и использование ИСППР по разработанной технологии повышает качество и скорость принятия решений, обеспечивает их обоснованность, что имеет значительный экономический эффект в деятельности проектной организации.

Выводы

Впервые предложен оригинальный научно-обоснованный подход к созданию технологии раз-

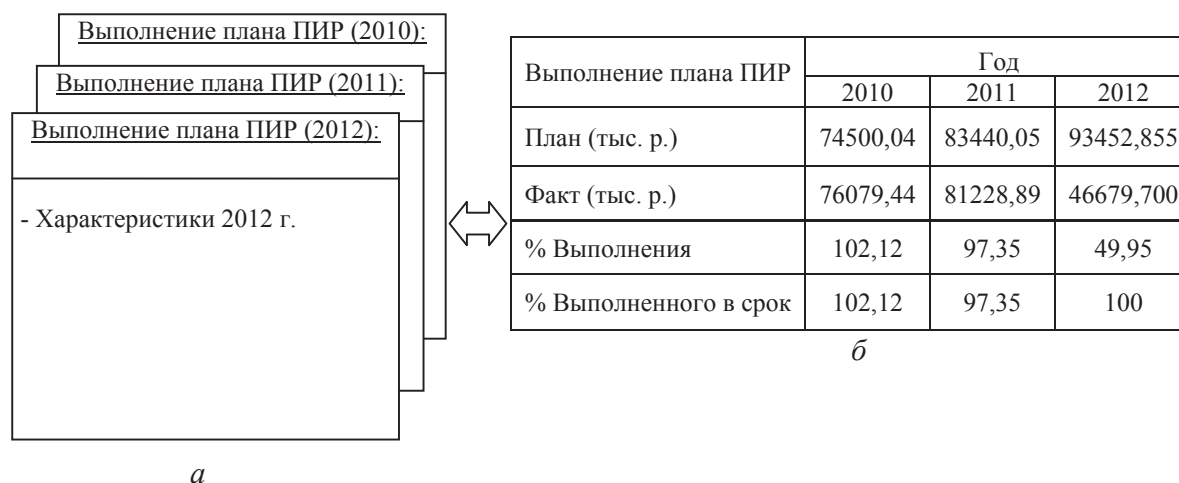


Рис. 4. Пример мультиобъекта «Выполнение плана ПИР»: а) графическая нотация; б) табличная форма

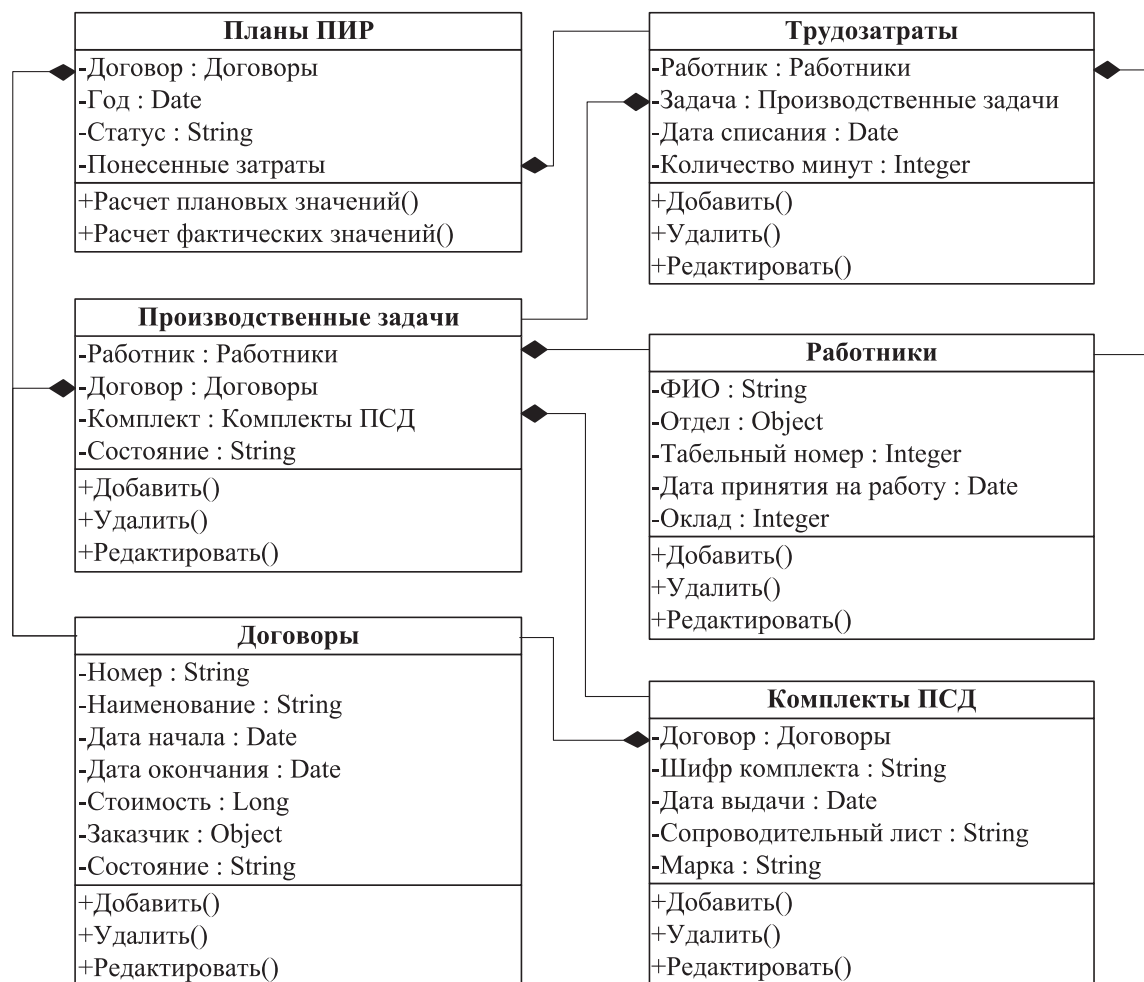


Рис. 5. Фрагмент модели компонентов интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению проектными работами

работки системы поддержки принятия решений для управления проектными работами при обустройстве месторождений нефти и газа на основе объектно-ориентированной методологии моделирования, заключающейся в представлении модели проблемосодержащей и проблеморазрешающей системы в виде совокупности взаимосвязанных моделей: классов, объектов, зависимостей атрибутов, компонент системы, координации.

Использование информационной технологии при разработке системы поддержки принятия решений позволяет не только обеспечить комплексность и согласованность компонентов системы и принимаемых решений, но также и существенно (приблизительно на 40...50 %) сократить трудовзатраты по сравнению с трудоемкостью разработки аналогичных интеллектуальных информационных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальгин Е.О. Совершенствование процесса управления проектированием разработки нефтяных месторождений: автореф. дис. ... канд. экон. наук. – Москва, 2010. – 23 с.
2. Гребенщиков С.А., Силич В.А., Комагоров В.П. Анализ проблем управления проектными работами при обустройстве месторождений нефти и газа // Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов VIII Всерос. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2010, 3–5 марта. – Ч. 2. – СПб.: Изд-во СПб Графикас, 2010. – С. 91–92.
3. Тузовский А.Ф., Чириков С.В., Ямпольский В.З. Системы управления знаниями (методы и технологии) / под общ. ред. В.З. Ямпольского. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 260 с.
4. Черкасов А.Н. Разработка математического и алгоритмического обеспечения адаптивных систем поддержки принятия решений в ситуационных центрах: автореф. дис.... канд. техн. наук. – Краснодар, 2011. – 25 с.
5. Силич М.П. Информационная технология разработки целевых программ на основе объектно-ориентированной методологии моделирования: дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2005. – 361 с.
6. Хабибулина Н.Ю. Модели, алгоритмы и инструментальные средства создания экспертных систем на базе функциональных сетей: дис.... канд. техн. наук. – Томск, 2005. – 218 с.

Поступила 25.06.2012 г.

УДК 519.175.1

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗОМОРФИЗМА ГРАФОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ АТРИБУТНЫМИ МАТРИЦАМИ

В.К. Погребной

Томский политехнический университет

E-mail: vkp@tpu.ru

Предложен алгоритм решения задачи определения изоморфизма графов, вершинам и ребрам которых приписаны атрибуты, представляющие графовую модель объекта. В основу алгоритма положен метод интеграции структурных различий, модифицированный для работы с атрибутивными матрицами графов. Для установления изоморфизма устойчивых групп разработано правило назначения абстрактных описателей при свободной и зависимой дифференциации вершин в этих группах. Работа алгоритма показана на примере определения изоморфизма двух графов общего вида.

Ключевые слова:

Изоморфизм графов, атрибутивная матрица, структурные различия, устойчивая группа, дифференциация вершин, абстрактный описатель.

Key words:

Graph isomorphism, attribute matrix, structural differences, stable group, peak differentiation, abstract descriptor.

Введение

Метод свободной и зависимой интеграции структурных различий (метод ISD), предложенный в работе [1], позволяет дифференцировать вершины обыкновенного графа, учитывая особенности их расположения относительно всех других вершин графа. В результате интеграции каждая вершина графа получает кодовое значение интегрального описателя. Как частный случай в [1] отмечается ситуация, когда в результате зависимой интеграции достигается полная дифференциация вершин и множества интегральных описателей у сравниваемых графов совпадают. Соблюдение этих условий свидетельствует о том, что сравниваемые графы являются изоморфными.

Неполная дифференциация вершин графов соответствует наличию в них устойчивых однородных групп [1] и даже при совпадающих интегральных описателях вопрос об изоморфизме графов остается открытым. В этом случае для определения изоморфизма графов необходимы дополнительные исследования устойчивых однородных групп и разработка правил дифференциации их вершин. Решению этих задач посвящена данная статья. Применение и развитие метода ISD осуществляется для определения изоморфизма графов общего вида [2] с учетом использования произвольной совокупности структурных различий. Заметим, что предварительный анализ эффективности применения метода ISD для определения изоморфизма графов ставит под сомнение отнесение этой задачи к классу неполиномиальной сложности.

Структурные различия в графах

Вершины и ребра графа, отражающего структурные свойства некоторого объекта, часто сопровождаются указанием определенных свойств (атрибутов). Для ребер атрибутами могут быть, например: тип коммуникации, ориентация, пропускная способность, вероятность или интенсивность пе-

рехода между вершинами. Примерами атрибутов для вершин являются: вместимость, степень, число петель, типы входов и выходов. Среди атрибутов интерес представляют только те из них, которые приводят к дифференциации вершин графа. Так, если степени у всех вершин совпадают, то такой атрибут не вносит структурные различия в граф, т. е. относительно данного атрибута все вершины оказываются неразличимы.

Совокупность атрибутов, вводимых для исходной дифференциации вершин, зависит от вида графовой модели и делится на две группы – назначаемые атрибуты и вычисляемые. Первые из них отражают заданные свойства объекта. Например, ребра графа, отражающие наличие коммуникаций между узлами сети, могут сопровождаться указанием трех свойств – тип канала связи, степень помехозащитенности, пропускная способность. Каждому свойству ставится в соответствие атрибут и назначается определенный набор его кодовых значений. Вторую группу составляют вычисляемые атрибуты. Примером самого простого и легко вычисляемого атрибута является степень вершины. Представителем наиболее сложно вычисляемого атрибута может служить принадлежность вершины к наибольшему внутренне устойчивому множеству. Менее сложно вычисляется принадлежность вершины к множеству центральных [2].

Структурные различия, порождаемые назначаемыми атрибутами, будем именовать внешними, а получаемые на основе вычислений – внутренними. Особый интерес представляют структурные различия, отражающие расхождения в структуре отношений между вершинами графа. Такие структурные различия, являясь по своей природе внутренними, не поддаются вычислению и названы базовыми или скрытыми. Задача обнаружения этих различий по сложности оказалась сопоставима с исходной задачей определения изоморфизма графов. Можно сказать, что базовые различия недо-

ступны для обнаружения, т. е. скрыты от нас. Поэ- тому они и названы скрытыми.

Проблема здесь связана с тем, что для их обна- ружения необходимо выполнить анализ отноше- ний инцидентов каждой вершины, которые в свою очередь учитывают иерархию отношений с инцидентами всех других вершин. Выполнение данного анализа составляет основное содержание метода ISD. Однако метод работает только при нали- чии некоторой исходной дифференциации вер- шин, полученной за счет внешних и (или) вну- тренних различий. В этом случае скрытые струк- турные различия «проявляются» относительно ис- ходной дифференциации и в отличие от базовых (скрытых) различий именуется относительными.

Для учета атрибутов при описании графа $G=(E,S,F)$ с множеством вершин $E=\{e_i, i=1,2,\dots,n$, множеством ребер $S=\{s_{ij}\}$, функцией F , устанавли- вающей инцидентность ребер s_{ij} вершинам e_i , каж- дому ребру и вершине ставятся в соответствие зна- чения атрибутов, сопровождающих построение графовой модели. В множестве атрибутов $A=\{A_v\}$ каждый атрибут v -го вида A_v представлен совокуп- ностью символьных или числовых значений $\{a_q^v\}$. Значения атрибутов a_q^v , приписываемые конкрет- ному ребру или вершине, перечисляются в приня- той последовательности видов $v=1,2,\dots$ и указыва- ются в скобках через запятую, например, (a_3^1, a_1^4) . Запись (a_3^1, a_1^4) означает, что используется 3-е зна- чение 1-го атрибута и 1-е значения 4-го атрибута, а атрибуты A_2, A_3 в формировании записи не уча- ствуют.

Граф G с назначенными атрибутами можно представить в виде атрибутной матрицы связности вершин $R=\|r_{ij}\|$. Элемент матрицы r_{ij} включает запи- си атрибутов всех ребер $s_{ij} \in S$, связывающих верши- ны e_i и e_j , а элемент r_{ii} – записи атрибутов вершины e_i . При записи элемента r_{ij} будем руководствоваться следующими правилами:

- если вершины e_i и e_j связаны несколькими рё- брами, то записи атрибутов ребер в элементе r_{ij} перечисляются через запятую в любой последо- вательности, например, $(a_3^1, a_1^4), (a_1^1, a_1^4), (a_2^1, a_3^4)$;
- если элемент r_{ij} содержит p ребер с одинаковы- ми атрибутами, то такие ребра могут объеди- няться в одну запись с указанием перед скобкой величины p , например, $p(a_3^1, a_1^4)$.

На рис. 1 представлен пример графа общего ви- да G и его атрибутная матрица R . Для построения матрицы R использован один вид атрибута $A_1=(a,b,c,d)$. Значения атрибута A_1 приписываются рёбрам s_{ij} следующим образом:

- a – если s_{ij} дуга из вершины e_i в вершину e_j ;
- b – если s_{ij} дуга из вершины e_j в вершину e_i ;
- c – если s_{ij} звено, связывающее вершины e_i и e_j ;
- d – если s_{ij} петля при вершине e_i .

Учитывая, что в примере использован атрибут одного вида, а элемент r_{ij} включает не более одного ребра, скобки в записях атрибутов ребер опущены.

Атрибут A_1 , описывающий типы ребер графа G , в данном примере не порождает внешние струк- турные различия, т. е. не приводит к дифференци- ации вершин. Внутренние структурные различия на основе степеней вершин, подсчитанные по всем типам ребер, в графе G также не удается выделить. Таким образом, относительно этих атрибутов, граф G , приведенный на рис. 1, оказывается однород- ным. Это означает, что для дифференциации вер- шин в данном случае могут привлекаться только скрытые структурные различия.

Метод обнаружения и интеграции относительных структурных различий

Ранее отмечалось, что скрытые структурные различия могут быть обнаружены как относитель- ные в условиях, когда имеется некоторая исходная дифференциация вершин, относительно которых с помощью метода ISD улавливаются структурные различия и происходит дифференциация вершин. В примере графа G на рис. 1 исходная дифферен- циация вершин отсутствует и, соответственно, все значения вектора исходной дифференциации D^0 приняты равными 1. Поэтому для применения метода ISD введем искусственную дифференци- ацию вершин путем присвоения одной из них, на- пример e_1 , абстрактного описателя (кодового чи- сла) $d_1^0=d_1^0+1=2$.

Введение в вектор D^0 абстрактного описателя d_1^0 выделяет вершину e_1 среди всех других вершин гра- фа, аналогично тому, как если бы при вершине e_1 была, например, одна петля и тогда, согласно ат- трибуту A_1 , элемент $r_{11}=d$, что также привело бы к вы- делению вершины e_1 в векторе D^0 . Из этого следует, что вектор $D^0=(2,1,\dots,1)$, полученный с учётом на-

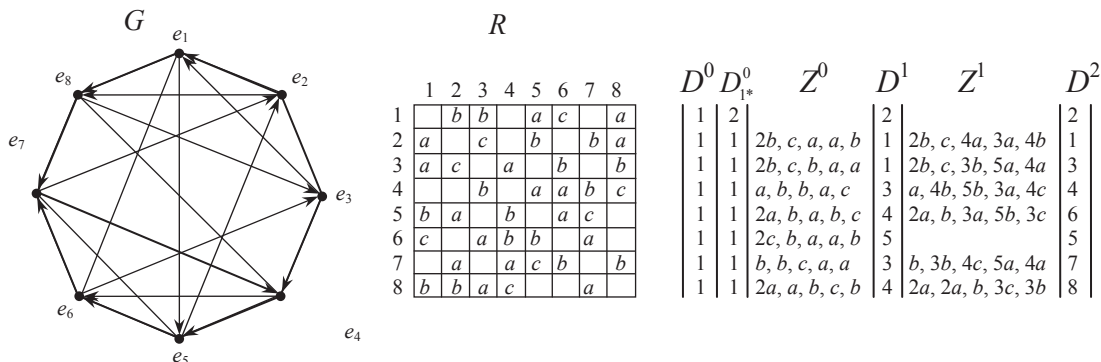


Рис. 1. Граф общего вида G , его атрибутная матрица R и результат свободной дифференциации вершин

личия петли при вершине e_1 , и вектор $D_i^0=(2,1,\dots,1)$, полученный в результате введения абстрактного описателя d_i^0 , оказываются неразличимыми и одинаково воспринимаются методом ISD.

При этом следует помнить, что в случае использования вектора D_i^0 результат дифференциации получен относительно произвольно выбранной вершины. Поэтому при определении изоморфизма двух однородных графов G и H для вершины e_1 в графе G необходимо найти вершину e_j в графе H с совпадающими результатами свободной и зависимой дифференциации. В частности, если графы G и H неизоморфны, то, чтобы убедиться в этом, потребуется в графе H выполнять зависимую дифференциацию относительно всех вершин e_j .

Дифференциация вершин достигается с помощью пошагового выполнения метода интеграции структурных различий, настроенного на работу с атрибутивной матрицей. На очередном k -м шаге метод ISD для каждой вектор-строки R_i атрибутивной матрицы R и вектора D^k выполняет операцию композиции векторов. Данную операцию обозначим символом \circ и в результате её выполнения над векторами D^k и R_i получим вектор \bar{Z}_i^k , т. е. $D^k \circ R_i = \bar{Z}_i^k$, $D^k = \{d_i^k\}$, $R_i = \{r_{ij}\}$, $\bar{Z}_i^k = \{z_{ij}^k\}$, $i, j = 1, 2, \dots, n$. Элементы z_{ij}^k вектора \bar{Z}_i^k определяются согласно логическому выражению:

$$\forall j [r_{ij} \neq \emptyset] \Rightarrow (z_{ij}^k = d_i^k(r_{ij})), \text{ иначе } (z_{ij}^k = \emptyset).$$

Запись $d_i^k(r_{ij})$ здесь означает, что в результате выполнения операции \circ элемент r_{ij} необходимо указать в скобках и слева приписать элемент d_i^k . Например, запись $d_4^2((a_3^1, a_4^1), 2(a_1^1, a_1^4), (a_2^1, a_3^4))$ соответствует композиции описателя d_4^2 вершины e_4 и элемента r_{4j} , включающего значения атрибутов A_1 и A_4 для 4-х рёбер, связывающих вершины e_4 и e_j . Заметим, что включать описатель d_i^k в совокупность атрибутов рёбер элемента r_{ij} нельзя, т. к. значение некоторого атрибута может совпасть с кодовым числом описателя, что нарушит дифференциацию вершин.

Вектор \bar{Z}_i^k , полученный в результате выполнения операции композиции, преобразуется в множество $Z_i^k = \{z_{ij}^k \neq \emptyset\}$. Элементы z_{ij}^k в множестве Z_i^k могут располагаться в любой последовательности. При выполнении шага интеграции множества Z_i^k оформляются только для вершин e_i , у которых кодовые числа d_i^k не являются уникальными интегральными описателями. Множества Z_i^k составляют совокупность $Z^k = \{Z_i^k\}$, которая используется для присвоения кодовых чисел d_i^{k+1} .

На рис. 1 справа от матрицы R приведена совокупность Z^0 множеств Z_i^0 , полученных в результате выполнения операции композиции вектор-столбцов матрицы R и вектора D_i^0 . При этом скобки в записях $d_i^0(r_{ij})$ опущены, т. к. атрибуты рёбер в данном примере не являются числовыми, а кратность рёбер отсутствует. Например, полная запись множества Z_5^0 должна иметь вид: $2(a), 1(b), 1(a), 1(b), 1(c)$. Замена векторов-строк R_i на вектор-

столбцы $R_{=i}$ является допустимой и используется в примере на рис. 1 для наглядности выполнения операции композиции.

Рассмотрим правила, по которым множествам $Z_i^k \in Z^k$ назначаются кодовые числа d_i^{k+1} при свободной дифференциации вершин. Кодовые числа d_i^{k+1} выбираются из множества чисел $I=(1,2,\dots,n)$. Множество выбранных (назначенных) кодовых чисел d_i^{k+1} на k -м шаге интеграции обозначим I^{k+1} . Множество уникальных интегральных описателей d_i^k , содержащихся в векторе D^k , обозначим I^k , $I^k \subseteq I$. Если $I^k = I$, то будем считать, что имела место полная дифференциация вершин, если $I^k \subset I$, то частичная.

Назначение кодовых чисел d_i^{k+1} множествам Z_i^k производится следующим образом:

1. Если $d_i^k \in I^k$, то $d_i^{k+1} = d_i^k$ и d_i^{k+1} включается в I^{k+1} ;
2. Если $(I^{k+1} \setminus I^k) = \emptyset$, то одному из множеств $Z_i^k \in Z^k$ назначается $d_i^{k+1} = \min(I \setminus I^k)$. Выбранное множество Z_i^k исключается из Z^k и включается в Z^k .
3. Если $(I^{k+1} \setminus I^k) \neq \emptyset$ и $Z^k \neq \emptyset$, то множество $Z_i^k \in Z^k$, $j \neq i$ сравнивается с каждым из множеств $Z_j^k \in Z^k$. При совпадении с одним из $Z_j^k \in Z^k$ множеству Z_j^k назначается $d_j^{k+1} = d_i^{k+1}$, в противном случае множеству Z_i^k ставится в соответствие $d_i^{k+1} = \min(I \setminus I^k)$.
4. Множество I^{k+1} анализируется на наличие уникальных интегральных описателей, которые включаются в множество I^{k+1} .

Следующий шаг интеграции по пунктам 1–4 выполняется, если $I^{k+1} \neq I$ и $I^{k+1} \neq I$.

Для примера на рис. 1 после первого шага интеграции получилось $I^1 \neq I$ и $I^1 \neq I$, $I^1 = (d_1^1 = 2, d_6^1 = 5)$. После выполнения второго шага получено множество $I^2 = I^1 = I$, т. е. имеет место полная дифференциация вершин. Относительные структурные различия можно обнаружить на каждом шаге интеграции, сравнивая, например, множества $Z_2^1 = (2(b), 1(c), 4(a), 3(a), 4(b))$ и $Z_3^1 = (2(b), 1(c), 3(b), 5(a), 4(a))$, которые на первом шаге были равны, $d_2^1 = d_3^1 = 1$, а на втором шаге оказались разными с $d_2^2 = 1$ и $d_3^2 = 3$.

В изложенном методе интеграции реализован алгоритм свободной дифференциации вершин, когда кодовое число d_i^{k+1} для очередного множества Z_i^k , несовпадающего с предыдущими множествами, выбирается как минимальное число среди незанятых (свободных) чисел множества $I \setminus I^{k+1}$. При решении задачи определения изоморфизма графов G и H наряду со свободной дифференциацией вершин графа G используется зависимая дифференциация вершин графа H . Алгоритм зависимой дифференциации отличается тем, что назначение d_i^{k+1} множеству Z_i^k в графе H полностью определяется в зависимости от кодового числа d_i^{k+1} , назначенного множеству Z_i^k в графе G , совпадающему с множеством Z_j^k . При наличии в графе G множества $Z_i^k = Z_j^k$ множеству Z_j^k назначается кодовое число d_i^{k+1} . Если для множества Z_j^k из графа H в графе G не находится множество $Z_i^k = Z_j^k$, то очевидно, что графы G и H неизоморфны.

Алгоритм определения изоморфизма графов, представленных атрибутными матрицами

Задача определения изоморфизма графов G и H легко решается, если в графе G в результате свободной интеграции относительно исходного вектора D^0 достигается полная дифференциация вершин. В этом случае, при условии, что множества кодовых чисел в векторах $D^k(G)$ и $D^k(H)$ для графов G и H совпадают, достаточно выполнить в графе H зависимую интеграцию, убеждаясь на каждом k -м шаге, что множество $I^{k+1}(G) = I^{k+1}(H)$. Если на каком-либо шаге интеграции данные множества не совпадут, то графы G и H неизоморфны. Соответствие между вершинами изоморфных графов устанавливается по расположению одинаковых элементов в векторах $D^{k+1}(G) = \{d_i^{k+1}\}$ и $D^{k+1}(H) = \{d_i^{k+1}\}$.

В последующем основные исследования по разработке алгоритма определения изоморфизма будут сосредоточены на принятии решений в условиях, когда не удаётся достигнуть полной дифференциации вершин. Частичная дифференциация указывает на наличие в векторе D^k элементов с равными значениями d_i^k . Совокупность вершин с равными значениями d_i^k назовём однородной группой и обозначим $I^k(d_i^k)$. Однородные группы, полученные при условии $I^k = I^{k+1}$, назовём устойчивыми. Вершины в устойчивой группе $I^k(d_i^k)$ структурно неразличимы относительно исходной дифференциации вершин, определяемой вектором D^0 .

Исходя из этого определения, однородный граф, приведённый на рис. 1, можно отнести к устойчивой группе, т. к. выполнение шага интеграции относительно вектора D^0 не приводит к дифференциации вершин, т. е. $I^0 = I^1$. Вместе с тем, ранее отмечалось, что метод ISD работает при наличии некоторой исходной дифференциации. Вектор D^0 в нашем примере состоит из одинаковых элементов d_i^0 и поэтому не может быть принят в качестве вектора исходной дифференциации. Следовательно, однородный граф нельзя рассматривать в качестве устойчивой группы, т. к. относительная структурная неразличимость для вершин графа не была установлена. Это подтверждается результатами первого и второго шага интеграции, приведёнными на рис. 1, которые выполнены относительно исходной дифференциации, представленной вектором D_i^0 .

Наличие исходной дифференциации вовсе не означает, что последующие шаги интеграции приведут к дополнительной дифференциации вершин. Но устойчивые группы в данном случае будут содержать вершины, которые относительно исходной дифференциации структурно неразличимы.

Существование устойчивых групп обусловлено рядом жёстких требований, которые могут быть использованы при разработке способов дифференциации вершин в этих группах. Знание условий существования устойчивых групп и их свойств важно при исследовании проблемы оценки сходства структур графов, которая в данной статье не рассматривается. Что касается алгоритма определения

изоморфизма графов, то здесь можно ограничиться применением основного правила дифференциации вершин устойчивой группы, связанного с введением абстрактного описателя, аналогично тому, как это сделано для дифференциации вершин однородного графа на рис. 1.

Рассмотрим применение данного правила в составе алгоритма определения изоморфизма графов G и H . Пусть на k -м шаге свободной интеграции в графе G получена одна или несколько устойчивых групп. Для продолжения дифференциации в любой из групп $I^k(d_i^k)$ выбирается одна из вершин $e_i \in I^k(d_i^k)$, у которой описатель d_i^k заменяется на абстрактный описатель $d_i^k = \min(\Lambda I^k)$. Вектор D^k заменяется на вектор D_i^k , и относительно него выполняются шаги интеграции. Если при этом полная дифференциация не достигается, то введение абстрактного описателя в одну из устойчивых групп повторяется до тех пор, пока не произойдёт полная дифференциация.

На рис. 2, а, показан возможный сценарий свободной дифференциации вершин устойчивой группы A . В группе A графа G символом * помечена вершина, которой назначен абстрактный описатель. После выполнения шагов свободной интеграции, как следует из рис. 2, а, полная дифференциация вершин группы не произошла. В итоге получены 2 устойчивые группы B и C . Связь между группами указывает на источник, порождающий группу, и соответствует выполнению последовательности шагов интеграции, приводящих к её получению. Введение абстрактного описателя в группу B не привело к дифференциации вершин, т. к. сохранилась группа D . Обе группы D и C содержат по 2 вершины, поэтому для их дифференциации достаточно ввести в группы по одному абстрактному описателю и выполнить шаг интеграции.

Возможный сценарий зависимой дифференциации вершин устойчивой группы A' графа H приведён на рис. 2, б. Данный сценарий отражает работу алгоритма определения изоморфизма при условии, что в графах G и H оказались устойчивые группы A и A' с равными описателями. Последовательность введения абстрактных описателей и выполнение шагов интеграции при дифференциации вершин группы A' на рис. 2, б, показана исходя из предположения, что группы A и A' изоморфны. После введения в группу A' абстрактного описателя получают группы B' и C' аналогичные группам B и C . Попытки дифференциации вершин в группе B' по аналогии с группой B к успеху не привели. На рис. 2, б, это отмечено назначением абстрактного описателя для каждой вершины группы B' и стрелками со знаком \neq , что указывает на появление несовпадающих множеств Z_i^k при зависимой интеграции.

Попытки установить изоморфизм относительно второй, третьей и четвёртой вершины группы A' также оказались несостоятельными, что отмечено стрелками со знаком \neq , а относительно пятой вершины изоморфизм подтвердился. Заметим также,

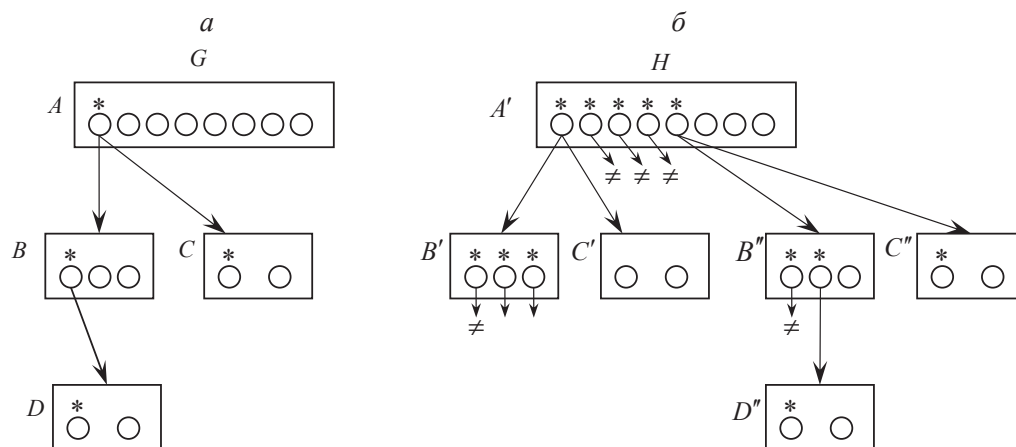


Рис. 2. Сценарии свободной и зависимой дифференциации вершин устойчивых групп

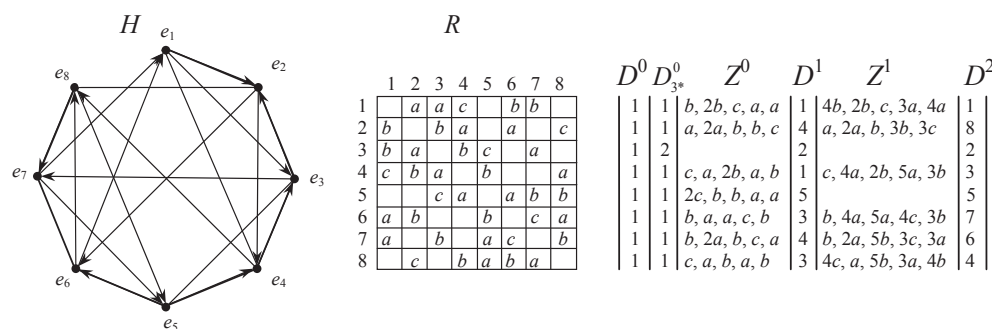


Рис. 3. Зависимая дифференциация вершин однородного графа H относительно графа G, рис. 1

что в группе B'' подтверждение изоморфизма получено относительно второй вершины этой группы.

Подобрать реальный пример устойчивой группы с приведённой на рис. 2 иерархией и вложенностью групп чрезвычайно трудно. Такая конфигурация вложенности групп подобрана для более наглядной иллюстрации работы алгоритма свободной и зависимой дифференциации вершин устойчивой группы. В целом можно предположить, что условия существования внутри устойчивой группы других устойчивых групп являются более жёсткими, чем в графах.

Например, при свободной дифференциации вершин однородного графа G (рис. 1) после введения абстрактного описателя достигнута полная дифференциация вершин.

Аналогично зависимая относительно графа G дифференциация вершин однородного графа H, приведённая на рис. 3, не выявила устойчивых групп. Графы G и H имеют равные D^i, как показывают результаты работы алгоритма (рис. 1 и 3), являются изоморфными. Алгоритм показал, что изоморфизм устанавливается после назначения абстрактного описателя вершине e_3 в графе H. Две первые попытки назначения абстрактных описате-

лей вершинам e_1 и e_2 (на рис. 3 не показаны) не привели к установлению изоморфизма. В этих попытках устойчивые группы также отсутствовали.

Заключение

Метод ISD, выполняющий шаги свободной и зависимой интеграции структурных различий, преобразован в статье для работы с атрибутивной матрицей, описывающей графовую модель. При разработке алгоритма решения задачи определения изоморфизма основное внимание было уделено дифференциации вершин в устойчивых группах. Предложено правило назначения абстрактных описателей вершинам устойчивых групп при свободной и зависимой дифференциации. Правило разработано исходя из предположения, что сокращение числа шагов интеграции, которое возможно при учёте свойств устойчивых групп, существенно не повысит эффективность работы алгоритма, т. к. объём вычислений при определении свойств может оказаться значительным. Поэтому перспективным для развития алгоритма представляется учёт легко определяемых свойств устойчивых групп.

Работа выполнена в рамках госзадания «Наука».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погребной В.К. Метод интеграции структурных различий в графовых моделях и его применение для описания структур // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 10–16.

2. Зыков А.А. Основы теории графов. – М: Изд-во КомКнига, 2004. – 644 с.

Поступила 27.09.2012 г.

УДК 004.352.242

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА И КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ

Д.С. Григорьев, В.Г. Спицын

Томский политехнический университет

E-mail: _tryGX@sibmail.com

Разработана и представлена система для анализа и классификации оцифрованных электрокардиограмм на основе применения вейвлет-преобразования и искусственной нейронной сети. Осуществлен выбор оптимальной конфигурации элементов системы. Проанализированы результаты численных экспериментов по распознаванию электрокардиограммы с аритмией и нормальным синусоидальным ритмом.

Ключевые слова:

Оцифрованные электрокардиограммы, вейвлет-преобразование, аритмия, искусственные нейронные сети, вейвлеты Добеши.

Key words:

Digital electrocardiograms, wavelet transform, arrhythmia, artificial neural networks, Daubechies wavelets.

Введение

В электрокардиографии для обнаружения, извлечения и анализа различных компонентов электрокардиограммы (ЭКГ) применяются различные методы обработки цифровых сигналов.

Классическим приемом, применяемым для анализа ЭКГ, является использование известных методов анализа характеристик сигнала в зависимости от времени (стандартное ЭКГ-измерение, измерение частоты сердечных сокращений, определение дисперсии реполяризации) [1].

Следует отметить, что указанные методы анализа характеристик сигнала не всегда позволяют описать все существенные особенности ЭКГ. Например, определение позднего потенциала, расположенного в комплексе QRS, не может быть выполнено с использованием таких методов. Тем не менее, анализ временной области частоты сердечных сокращений дает полную информацию о поведении RR-интервалов и парасимпатическом воздействии. Однако анализ симпатического упорядочивания не может быть проведен на основе измере-

ний частоты сердечных сокращений во временной области [1]. Использование аппарата вейвлет-анализа позволяет получать исчерпывающую информацию, находящуюся как во временной, так и в частотных областях.

Возможность одновременного анализа частотной и временной областей обосновывает выбор аппарата вейвлет-преобразования для анализа ЭКГ, который с успехом применяется в анализе частотно-временных характеристик компонент сигнала [1, 2].

Задачу диагностирования отклонений от нормы, в данном случае на ЭКГ, можно отнести к задаче распознавания образов. Применение в данной работе искусственной нейронной сети в качестве классификатора обусловлено ее способностью к обработке нечетких и сложных исходных данных для их классификации [3].

Целью данной работы является разработка метода распознавания отклонений от нормы на ЭКГ на основе совместного применения дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) и искусственной нейронной сети (НС).

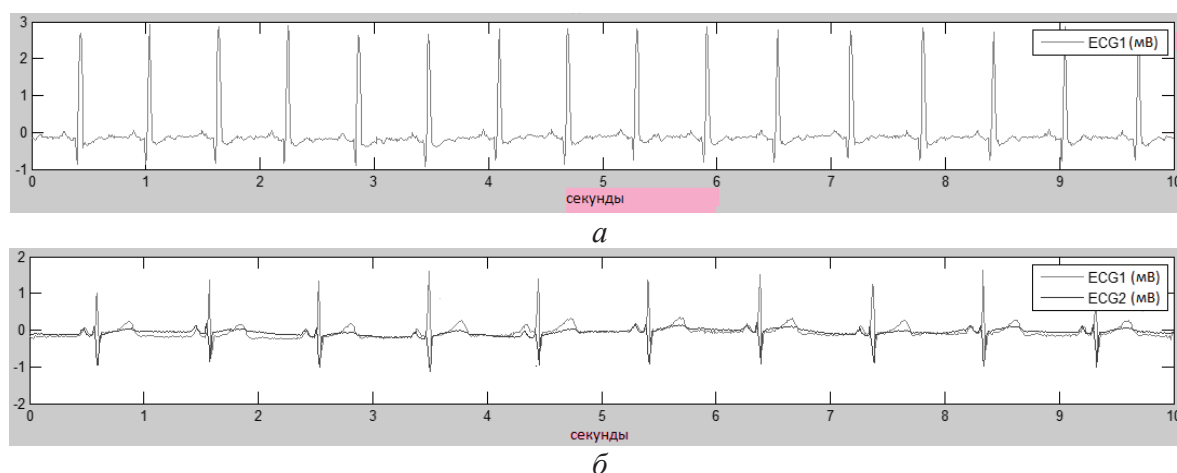


Рис. 1. ЭКГ нормального синусоидального ритма в отведениях: а) одном; б) двух

Исходные данные

Исходные данные, которые были использованы при тестировании системы, представляют собой оцифрованные сигналы ЭКГ в различных отведениях. Оцифрованные ЭКГ представляли собой вектора значений потенциала (напряжения), снятых с частотой 128 Гц за 10 с. Используемый набор состоит из 173 ЭКГ, включает в себя сигналы аритмии, а также нормального синусоидального ритма. Все сигналы взяты из открытой базы данных MIT [4].

Одномерное дискретное вейвлет-преобразование

В отличие от преобразования Фурье, базисными функциями которого являются гармонические функции, вейвлет-преобразование основано на разложении по функциям, изменяющейся частоты и ограниченным по времени [5]. Вейвлеты является приемлемым инструментом для обработки сигналов, позволяющим проводить анализ в нескольких временных масштабах локальных свойств нестационарного сигнала.

Как известно, кратномасштабный анализ инвариантен к целочисленным сдвигам по временной оси и по отношению к растяжениям, кратным степеням 2. В данной работе для получения коэффициентов разложения исходного сигнала выбирается метод кратномасштабного анализа.

Так как электрокардиограмма представляет собой функцию одного аргумента, то, задав масштабирующую и вейвлет-функции, выполним алгоритм быстрого вейвлет-преобразования (БВП). Семейство базисных функций, определенное с помощью операций сдвигов и изменений масштаба имеет вид:

$$\varphi(2^j x - k) = \sum_m h_\varphi(m - 2k)\sqrt{2}\varphi(2^{j+1} - m), \quad (1)$$

$$(2^j x - k) = \sum_m h_\psi(m - 2k)\sqrt{2} (2^{j+1} - m). \quad (2)$$

Здесь h_φ, h_ψ – масштабные коэффициенты масштабирующей и вейвлет-функции.

Аналогично разложению в ряд Фурье, разложение в вейвлет-ряд ставит в соответствие непрерывной функции последовательность коэффициентов. В нашем случае разложение определяется следующими преобразованиями:

$$W_\varphi(j_0, k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x)\varphi_{j_0,k}(x), \quad (3)$$

$$W_\psi(j, k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x)\psi_{j,k}(x). \quad (4)$$

Здесь $x=0,1,2,\dots,M-1; j=0,1,2,\dots,J-1, k=0,1,2,\dots,2^{j-1}$. Коэффициенты, описываемые ур. (3) и (4), являются соответственно коэффициентами аппроксимации и детализации. Для реализации вычислений ДВП, используется взаимосвязь между коэффициентами ДВП соседних масштабов. Коэффициенты самого крупного масштаба – исходные данные для последующих вычислений, $W_\varphi(J,n)=f(x)$, где J – самый крупный масштаб [6].

В нашем случае, блок фильтров, рис. 2, используется в качестве базового элемента для итеративной многоступенчатой структуры вычисления БВП – коэффициентов в двух последовательных масштабах.

Тип вейвлет-функции

Для того чтобы в полной мере использовать свойство внутренней симметричности кратномасштабного анализа, требуется фактическое построение базисных масштабирующей и вейвлет-функций, удовлетворяющих условиям ортонормированности. Таковыми являются вейвлеты Добеши – это непрерывные не тождественные нулю и недифференцируемые на конечном отрезке функции. Область задания у ортонормальных вейвлетов Добеши шире, чем у вейвлетов Хаара, они обеспечивают при вейвлет-преобразовании большее количество малозначимых коэффициентов разложения, сохраняя информационную ценность исходных данных.

Тип используемой вейвлет-функции – функция Добеши 4 порядка. Порядок функции обусловлен величиной вектора коэффициентов аппроксимации. При его увеличении соответственно растет вектор коэффициентов, поданный на входной слой нейронной сети, что ведет к возрастанию вычислительной сложности. Примеры результатов работы блока вейвлет-преобразования представлен на рис. 3, 4.

Уровень вейвлет-преобразования

В результате применения ДВП к ЭКГ произошло извлечение коэффициентов аппроксимации и коэффициентов детализации. В дальнейшем использовался только набор коэффициентов аппроксимации: в качестве точки отсчета для последующего применения блока фильтров БВП, а также

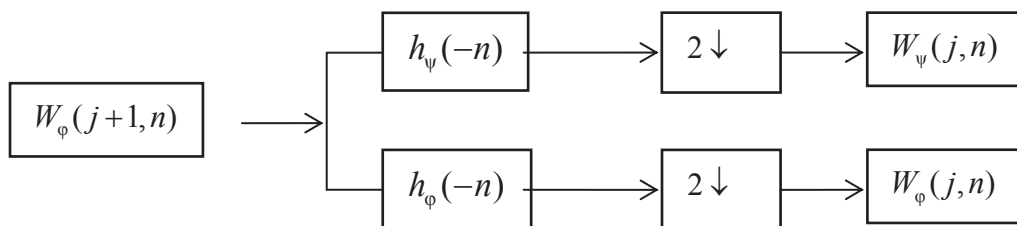


Рис. 2. Блок фильтров ДВП анализа

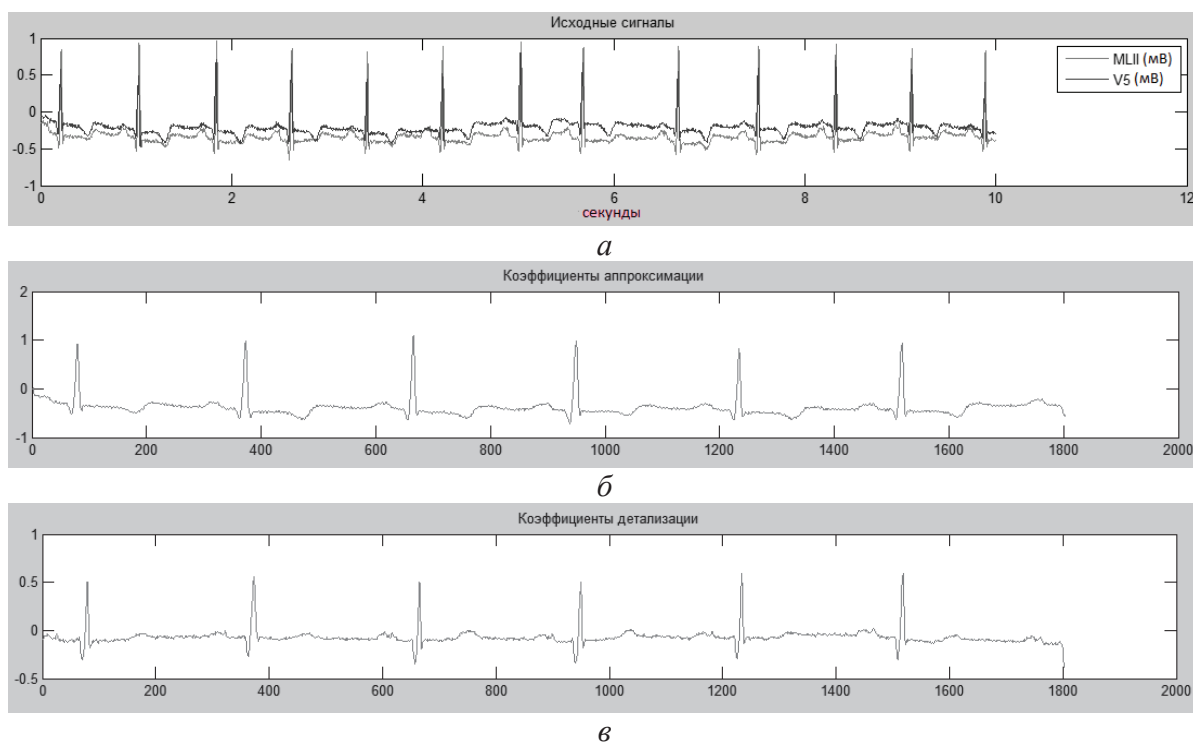


Рис. 3. Сигнал ЭКГ с аритмией в отведении V5: а) исходный; б, в) представленный в виде коэффициентов аппроксимации и детализации

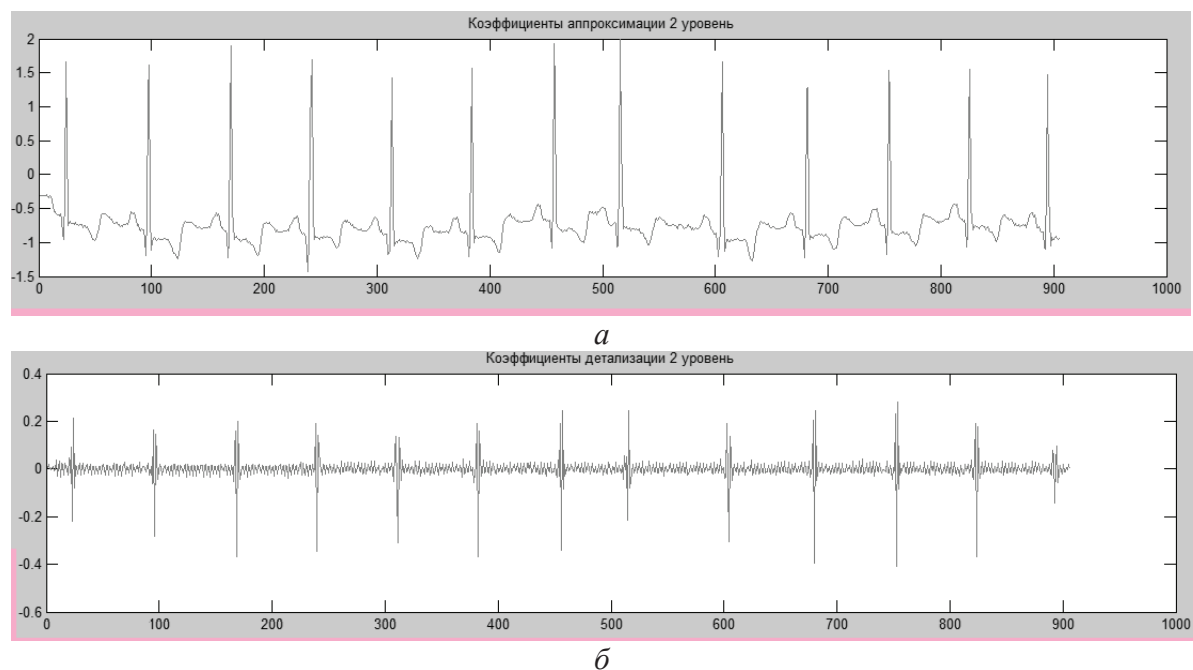


Рис. 4. Коэффициенты после повторного применения блока БВП: а) детализации; б) аппроксимации

в качестве входного сигнала для нейронной сети. Результат тестирования показал, что оптимальное количество применения блоков БВП фильтров равно 2. При каждом последующем применении блока БВП размер вектора коэффициентов аппроксимации сокращается вдвое, при уменьшающейся информативности самого вектора, а также при понижении процента распознавания.

Используя только один уровень применения БВП фильтра, получаем большую размерность вектора коэффициентов, что существенно уменьшает скорость сходимости нейронной сети. Таким образом, при исходном количестве в 3600 значений, после применения блока фильтров БВП размерность вектора коэффициентов сокращается до 1800.

Применение двухуровневого БВП преобразования показало наилучшую скорость сходимости нейронной сети при обучении и высокий процент распознавания.

Нейронная сеть

Искусственные нейронные сети с их высокой способностью извлекать требуемые значения из сложных или неточных исходных данных, часто используются в качестве классификатора для распознавания образов [3]. Еще одно положительное качество НС – это обнаружение характерных свойств исследуемых объектов, сложных для их обнаружения людьми или же некоторыми машинными средствами. Именно поэтому НС являются одними из самых эффективных методов классификации образов.

Выходной сигнал каждого отдельного нейрона выходного слоя определяется выражением:

$$y_k = f \left(\sum_{i=0}^K w_{ki} f \left(\sum_{j=0}^N w_{ij} x_j \right) \right). \quad (5)$$

В качестве активационной функции каждого отдельного нейрона была выбрана непрерывная сигмоидальная биполярная функция, так как для разработки обучающего правила необходима дифференцируемость вдоль всех связей НС [5]:

$$f(x) = \text{th}(x). \quad (6)$$

Функционирование нейронной сети происходит в два этапа: обучения и тестирования. Для обучения НС выбрано три алгоритма:

- Левенберга–Марквардта;
- Сопряженных градиентов;
- Обратного распространения ошибки.

Пусть $\mathbf{y}=[y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ – вектор фактических выходных сигналов; $\mathbf{d}=[d_1, d_2, \dots, d_m]^T$ – вектор ожидаемых выходных сигналов; – весовые значения си-напсов.

В этом случае целевая функция минимизации ошибки алгоритмов обучения имеет вид:

$$E(\mathbf{W}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M [e_i(\mathbf{W})]^2, \quad (7)$$

где $e_i(\mathbf{W})=[y_i(\mathbf{W})-d_i]$.

Преимущество алгоритма обратного распространения ошибки состоит в относительно простой реализации. Однако он не гарантирует нахождение глобального минимума целевой функции. В частности, реализованный в алгоритме градиентный спуск может привести к нахождению локального минимума, вместо глобального.

Алгоритм сопряженных градиентов при достаточно хорошем начальном приближении обладает приемлемой производительностью. Однако при его применении существует проблема остановки в локальном минимуме. Алгоритм Левенберга–Марквардта сочетает в себе свойства градиентного спуска и метода Гаусса–Ньютона, и в отличие

от метода сопряженных градиентов использует матрицу Якоби вместо градиента вектора параметров.

Результаты экспериментов

Все части системы были реализованы и протестированы при помощи пакетов разработки Microsoft Visual Studio 2010 и MATLAB. Результаты работы системы представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Результаты распознавания на обучающей и тестовой выборках

Алгоритм обучения	Размер обучающей выборки	Время обучения, мин.	Время тестирования, мин.	Процент распознавания на обучающей выборке, %	Время тестирования, мин.	Процент распознавания на тестовой выборке, %
Левенберга–Марквардта	173	20:17	05:13	100	04:09	89
Сопряженных градиентов		29:43	03:45	100	02:10	69
Обратного распространения ошибки		38:21	04:12	100	03:11	76

Результаты численных экспериментов, представленных в табл. 1, показывают, что наибольшей классификационной точностью обладает алгоритм Левенберга–Марквардта – 89 %.

Так как разрабатываемый метод представляет собой разновидность диагностического метода, то следует обратиться к способам оценки результативности метода, применяемым в доказательной медицине. Результат пригодности системы по данным оценкам приведен в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оценки методов

Алгоритм обучения	Чувствительность, %	Специфичность, %
Левенберга–Марквардта	91,5	86,8
Сопряженных градиентов	69,4	68,7
Обратного распространения ошибки	75,0	77,1

Из табл. 2 видно, что близкие показатели значений чувствительности и специфичности работы сети после обучения алгоритмом сопряженных градиентов говорят о его несбалансированности по ложноположительным и ложноотрицательным диагнозам. Основные показатели пригодности системы для диагностирования оказались наилучшими после обучения алгоритмом Левенберга–Марквардта. Алгоритм обладает достаточно высокой чувствительностью в 91 %, а специфичность составила почти 87 %. Этот факт в совокупности с высоким показателем классификационной точности делает данный алгоритм более приемлемым для использования его в дальнейшем.

Заключение

1. Предложен метод анализа и классификации ЭКГ, заключающийся в вейвлет-анализе сигналов и нейросетевом распознавании образов на основе многослойного персептрона.
2. Осуществлен выбор оптимальных вариантов базисной вейвлет-функции и алгоритма обучения персептрона. Ими оказались вейвлет-функция Добеши четвертого порядка и алго-

ритм Левенберга–Марквардта для обучения нейронной сети.

3. Работоспособность разработанного метода диагностики была доказана на основе численных экспериментов.
4. Следующим этапом разработки системы будет ее оптимизация и тестирование на более длительных сигналах с целью диагностирования более широкого спектра заболеваний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойцов С.А., Гришаев С.Л., Солнцев В.Н., Кудрявцев Ю.С. Анализ сигнал-усредненной ЭКГ (по данным вейвлет-преобразования) у здоровых и больных ИБС // Вестник аритмологии. – 2001. – № 23. – С. 32–34.
2. Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J. Wavelets and their applications. – London: ISTE. – 2007. – 352 с.
3. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. – М.: Техносфера. – 2004. – 280 с.

4. Открытая база данных ЭКГ MIT. 2012. URL: <http://www.physionet.org/cgi-bin/atm/ATM> (дата обращения 30.01.2012).
5. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика. – 2001. – 464 с.
6. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

Поступила 17.09.2012 г.

УДК 519.174.1

ЗАДАЧА РАЗБИЕНИЯ МНОЖЕСТВА ОБЪЕКТОВ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ НА ПОДМНОЖЕСТВА НЕРАВНОЙ МОЩНОСТИ

Ал.В. Погребной, В.К. Погребной

Томский политехнический университет
E-mail: pogrebnoy@tpu.ru

Рассмотрена задача компактного разбиения множества объектов территориально распределенной системы на подмножества, число и мощность которых может меняться в заданных интервалах значений. Введено понятие естественных и относительных скоплений объектов. Разработан метод выделения скоплений, использующий компактные множества объектов и полученные на их основе функцию плотности и граф парных пересечений компактных множеств. Решение задачи разбиения сведено к установлению максимального соответствия между скоплениями и подмножествами.

Ключевые слова:

Задача разбиения, компактное множество, скопление объектов, функция плотности, граф парных пересечений.

Key words:

Decomposition task, compact set, collection of objects, density function, graph of the pair intersections.

Объекты территориально распределенных технических систем во многих случаях объединяются в иерархическую структуру, реализующую функции сбора данных, контроля и управления. Множество объектов на нижнем уровне иерархии разбиваются на подмножества, подключаемые к своему центру. В свою очередь, центры также могут группироваться в подмножества и подключаться к центрам более высокого уровня. Ниже исследуется задача формирования совокупности множеств объектов нижнего уровня иерархии. Принимается, что координаты размещения объектов на территории (топологическом поле [1]) известны, а фактор расстояний между объектами и центрами их подключения играет важную роль.

Задача компактного разбиения множества объектов, заданных координатами на топологиче-

ском поле, на подмножества равной мощности подробно рассмотрена в [1, 2]. Для алгоритма решения данной задачи, предложенного в [1], условие равной мощности подмножеств является существенным. Вместе с тем, во многих практических приложениях условие равной мощности подмножеств рассматривается как недостаток данного алгоритма. Очевидно, что этот недостаток в большей мере проявляется в тех случаях, когда объекты на топологическом поле расположены неравномерно. Кроме того, допускается, что число объектов подключаемых к центру, может меняться в некотором заранее установленном интервале. В этих условиях для решения задачи важно уметь выявлять компактные скопления объектов, мощность которых не выходит за пределы интервала значенных мощностей, установленных для подмножеств.

Статья посвящена разработке метода решения задачи разбиения множества объектов с учетом приведенных выше условий. В основу метода положено понятие компактного множества, введенного в [2]. Метод включает выделение на топологическом поле естественных и относительных компактных скоплений объектов и формирование подмножеств в заданном интервале мощностей с минимизацией суммарной оценки компактности.

Компактные множества и функция плотности расположения объектов

Объекты множества $Q=(q_i), i=1,2,\dots,n$, подлежащего разбиению, на топологическом поле представлены в виде точек с координатами (x_i, y_i) . Согласно положениям, изложенным в [2], для объекта $q_i \in Q$ может быть сформировано множество $Q_i(g)$ с заданной мощностью g , такое, что $Q_i(g) \subset Q, q_i \in Q_i(g)$, а величина R_i , определяющая суммарное расстояние от центра этого множества до всех вошедших в него объектов, является минимальной. Множество $Q_i(g)$, полученное относительно объекта q_i с минимальным значением R_i , названо компактным. Алгоритм формирования компактного множества $Q_i(g)$ мощностью g заключается в выборе из множества Q ровно $g-1$ объектов, доставляющих минимальное значение R_i . Эффективный алгоритм формирования таких множеств предложен в [2].

Таким образом, будем считать, что для всех объектов $q_i \in Q$ получены компактные множества Q_i мощностью g . Вопросы назначения величины g и ее влияния на решение задачи разбиения требуют отдельного исследования. Предполагается, что значение g может приниматься в диапазоне от трех до величины нижней границы интервала мощностей, установленного для подмножеств разбиения. Если число центров (число подмножеств разбиения) известно и равно C , то величина g может приниматься также исходя из условия: $3 \leq g \leq n/2C$, в котором $n/2C \geq 3$. Если $n/2C < 3$, то g принимается равным 3. Заметим, что независимо от принятого значения g формируется n множеств $Q_i(g)$.

Рассмотрим, каким образом можно воспользоваться наличием множеств $Q_i(g)$ для решения задачи разбиения. Напомним, что множества $Q_i(g)$ являются компактными и формируются независимо друг от друга. Следовательно множества $Q_i(g)$ могут пересекаться между собой. Увеличение мощности пересечения двух множеств $Q_i(g)$ при прочих равных условиях соответствует росту компактности (плотности) скопления объектов, входящих в эти множества. Сказанное иллюстрируется примером, представленным на рис. 1.

Суммарные оценки компактности множеств Q_1, Q_2 и Q'_1, Q'_2 совпадают, а мощность пересечения $|Q_1 \cap Q_2| > |Q'_1 \cap Q'_2|$. Это соответствует тому, что компактность объединения $(Q_1 \cup Q_2)$ выше (значение оценки R меньше), чем у объединения $(Q'_1 \cup Q'_2)$. Данные объединения представляют соответствующие локальные скопления, компактность которых

можно сопоставлять с плотностью расположения объектов на топологическом поле.

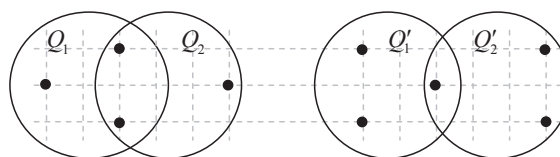


Рис. 1. Сравнение мощности пересечения множеств и компактности скоплений

В общем случае будем сравнивать две совокупности множеств $Q_i(g)$, обозначим их A и B , каждая из которых содержит равное число $Q_i(g)$ сформированных для определенного значения g . Пусть в A суммарная мощность парных пересечений множеств $Q_i(g)$ составляет величину $\rho(A)$, а в $B - \rho(B)$. Мощность объединения объектов множеств $Q_i(g)$ в A обозначим $s(A)$, а в $B - s(B)$. Если $\rho(A) > \rho(B)$, то нетрудно установить, что $s(A) < s(B)$. С увеличением $\rho(A)$ уменьшается число объектов, образующих некоторое скопление, на котором сформированы множества совокупности A , что соответствует увеличению плотности этого скопления. Из этого следует, что совокупность A объединяет множество объектов, которое относительно своего окружения выделяется как более плотное скопление.

Наличие связи параметра пересечений множеств $Q_i(g)$ с относительной плотностью скопления объектов имеет принципиально важное значение для выявления скоплений и формирования на этой основе подмножеств разбиения. Участие объекта $q_i \in Q$ в парных пересечениях множеств $Q_i(g)$, сформированных для фиксированного g , представим функцией $F_i(g)$. Значение $F_i(g)$ функции $F_i(g)$ равно числу вхождений объекта q_i в множества $Q_i(g)$. Функцию $F_i(g)$ назовем функцией плотности скопления объектов множества Q на топологическом поле. Принадлежность объекта q_i к пересечению некоторой совокупности компактных множеств свидетельствует о том, что в окрестности q_i присутствуют объекты, которые наряду с q_i входят в эту совокупность компактных множеств. Например, значение $F_i(g)=5$ означает, что объект q_i входит в состав пяти компактных множеств. Учитывая, что каждое из пяти множеств является компактным, можно говорить о принадлежности q_i к некоторому скоплению объектов, образованному этими множествами.

Выделение естественных компактных скоплений объектов

Неравномерная плотность расположения объектов на топологическом поле предполагает наличие скоплений, в которых объекты расположены более плотно. Пространство топологического поля между скоплениями может быть пустым либо содержать объекты удаленные друг от друга на расстоянии, которые соответствуют более низкой плотности, чем в соседних скоплениях. Здесь важно, что скопления выделяются как совокупность

объектов удаленных от объектов окружения на расстоянии, превышающие расстояния между объектами внутри скопления. Скопления, которые располагаются на топологическом поле и выделяются независимо от решения задачи разбиения множества объектов на подмножества, назовем *естественными*. Совокупность объектов S из множества Q является естественным скоплением, если все компактные множества $Q_i(g)$ мощностью g , сформированные для $q_i \in S$, состоят из объектов совокупности S , т. е. $Q_i(g) \subseteq S$.

Выделение естественных скоплений (ЕС) рассмотрим на примере фрагмента топологического поля, представленного на рис. 2.

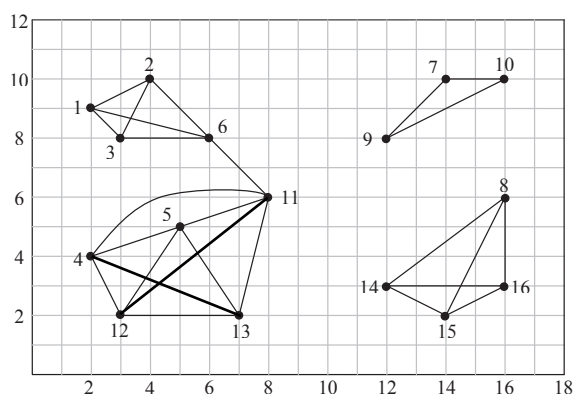


Рис. 2. Фрагмент топологического поля

Множество Q в примере на рис. 2 содержит 16 объектов. Ярко выраженные ЕС на топологическом поле отсутствуют. Визуально можно выделить три ЕС: $S_1^* = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13)$, $S_2^* = (7, 9, 10)$, $S_3^* = (8, 14, 15, 16)$. Рассмотрим возможные подходы к формализации методов решения задачи выделения ЕС. Примем $g=3$ и сформируем компактные множества $Q_i(3)$. Состав множеств $Q_i(3)$ и значения функции $F_i(3)$ представим в виде таблицы.

q_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$Q_i(3)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	2	1	1	5	4	2	9	15	7	7	5	4	5	15	14	14
	3	3	2	12	12	3	10	16	10	9	6	5	12	16	16	15
$F_i(3)$	3	4	4	3	5	2	3	1	3	3	1	4	1	3	4	4

Каждое множество $Q_i(3)$ представлено в столбце таблицы тремя объектами. На первом месте сверху столбца указан объект q_i , относительно которого сформировано компактное множество $Q_i(3)$. Внизу таблицы приведены значения функции $F_i(3)$, полученные для соответствующих q_i . Например, $F_6(3)=2$, т. к. объект q_6 входит в $Q_6(3)$ и $Q_{11}(3)$. Заметим, что компактные множества $Q_i(3)$ сформированы по алгоритму [2] согласно координатной сетке, обозначенной на рис. 2 снизу и слева от топологического поля. Оценки компактности R_i множеств $Q_i(3)$ вычислялись при этом относительно центров, которые определялись как центры единичных масс.

Используя значения $F_i(g)$, после выполнения аппроксимации получим функцию $F_i^*(g)$ в виде «холмистой» поверхности, на которой каждый «холм» соответствует скоплению объектов. Если все значения $F_i(g)$ уменьшить на величину $\min\{F_i(g)\}$, то некоторые «холмы» на поверхности $F_i^*(g)$ предстанут в виде «островов». По границе «острова» устанавливается граница соответствующего скопления. Выделенные скопления исключаются из множества Q , а операция вычитания минимального значения $F_i(g)$ и исключения скопления при необходимости повторяется. Объекты, которые оказались «потерянными» при выполнении операции вычитания минимального значения $F_i(g)$ распределяются между скоплениями.

Для рассматриваемого примера после вычитания 1 из $F_i(g)$ теряются соответствующие объекты q_8, q_{11}, q_{13} , что приводит к обособлению четырех «островков» (скоплений) $S_1^* = (1, 2, 3, 6)$, $S_2^* = (4, 5, 12)$, $S_3^* = (7, 9, 10)$, $S_4^* = (14, 15, 16)$. Заметим, что компактные множества, сформированные на объектах в разных скоплениях, не пересекаются между собой. По этому признаку, в частности, можно определять границы скоплений. Распределение «потерянных» объектов q_8, q_{11}, q_{13} по скоплениям производится в соответствии с их минимальным удалением от объектов скоплений: q_8 в S_4^* , q_{13} в S_2^* , q_{11} в S_3^* .

Полученную совокупность скоплений можно рассматривать как результат решения задачи свободного разбиения множества Q на подмножества, каждое из которых соответствует определенному скоплению. Очевидно, что свободное разбиение не всегда соответствует требованиям к разбиению по количеству подмножеств и их мощности, поэтому выделение ЕС и скоплений с уточненными границами будем рассматривать как этап предварительного анализа характера расположения объектов множества Q на топологическом поле.

Формирование подмножеств в заданном интервале мощностей

Основные параметры разбиения, связанные с ограничением числа подмножеств S и наличием интервала изменения допустимых мощностей $[a, b]$, могут устанавливаться в зависимости от результатов выделения скоплений. Решение задачи разбиения для заданных параметров будем рассматривать независимо от того получены они на основе выделенных скоплений или назначены по другим основаниям. Вместе с тем при разработке метода разбиения будем стремиться максимально использовать полученные скопления в качестве подмножеств.

Введем граф парных пересечений компактных множеств и обозначим его G . Вершины графа G соответствуют компактным множествам Q_i , а ребра (Q_i, Q_j) – наличию пересечений $Q_i \cap Q_j \neq \emptyset$ с весом $r_{ij} = |Q_i \cap Q_j|$. Граф G , отражающий парные пересечения компактных множеств для рассматриваемого примера, приведен на рис. 2. Вершины графа соот-

ветствуют объектам q_i , относительно которых были построены соответствующие компактные множества Q_i .

Матрица связности вершин данного графа с указанием весов ребер r_{ij} представлена на рис. 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1			3	3			2										1
2	3			3			2										2
3	3	3					2										3
4					3						1	3	2				4
5				3							1	3	2				5
6	2	2	2								1						6
7								3	3								7
8														2	2	2	8
9							3			3							9
10							3		3								10
11				1	1	1						1	1				11
12				3	3						1		2				12
13				2	2						1	2					13
14								2							3	3	14
15								2							3		15
16								2							3	3	16
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	

Рис. 3. Пример матрицы связности вершин графа G

Граф на рис. 2 состоит из трех компонент связности [3], которые по составу объектов соответствуют скоплениям S_1, S_2, S_3 , выделенным ранее визуально. В условиях, когда граф G является связным, т. е. состоит из одной компоненты связности, выделение скоплений можно осуществлять путем удаления ребер с минимальным весом, по аналогии с тем, как это делалось ранее при вычитании минимальных значений функций плотности. Например, удаление пяти ребер с весом $r_{ij}=1$, связывающих вершину Q_{11} в скоплении $s_1=(1,2,3,4,5,6,11,12,13)$, приводит к выделению скоплений $(1,2,3,6)$ и $(4,5,12,13)$. Полученная совокупность из четырех скоплений в данном примере может служить основой для принятия решения о разбиении множества Q на $C=4$ подмножества с интервалом мощностей $[a,b]=[3,5]$. Для данных значений параметров C и $[a,b]$ после включения объекта q_{11} в скопление $(4,5,12,13)$ имеем решение задачи разбиения. В общем случае, когда требуемые значения параметров C и $[a,b]$ назначены без предварительного выделения и анализа скоплений, решение задачи разбиения множества Q на подмножества включает выполнение следующих этапов.

1. По заданным значениям C и $[a, b]$ определяются усредненные (исходные) мощности подмножеств разбиения. Для этого величина n представляется в виде суммы (разложения) $n_0(C-k)+(n_0+1)k$. Здесь n_0 – целая часть величины n/C , а $k=n-n_0C$. Разложение величины n предполагает разбиение Q на $(C-k)$ подмножеств мощностью n_0 и k подмножеств мощностью (n_0+1) . Например, при $n=32$ и $C=5$ получим $n_0=6, k=2$, и мощно-

сти подмножеств будут приниматься согласно разложению $(6,6,6,7,7)$. Для примера на рис. 2 при $C=3$ разложение $n=16$ получим в виде $(5,5,6)$, а интервал $[a,b]$ в этом случае может быть принят равным [4,7].

- Для величины g , взятой из интервала $[3, a]$, формируются компактные множества $Q(g)$. При выборе исходного значения g предпочтение отдается $g=a$. Для проведения более глубокого анализа наличия ЕС меньшей мощности значение g может последовательно понижаться до 3.
- На основе анализа функции плотности $F(g)$ или (и) выделения компонент связности графа $G(g)$ проверяется наличие ЕС. Все ЕС, мощность которых укладывается в интервал $[a,b]$, заносятся в разложение, замещая его элементы. После этого незамещенные элементы разложения корректируются так, чтобы сумма элементов была равна n . Если ЕС отсутствуют, т. е. граф $G(q)$ состоит из одной компоненты связности или мощность ЕС превышает b , то соответствующая компонента связности подлежит разбиению.
- Разбиение компонент связности и графа G выполняется с помощью матричного алгоритма разрезания графов на минимально связанные подграфы и соответствующего программного средства CutGraf [4]. При этом размерность блоков матрицы-шаблона принимается в соответствии с элементами исходного разложения, если разрезается граф G . Если разрезается компонента связности, то используются незамещенные элементы из скорректированного разложения.
- Для выделенных ЕС и скоплений, полученных в результате решения задачи разрезания, определяются центры, и относительно них решается задача подключения объектов к центрам по критерию минимизации суммарной оценки компактности скоплений (подмножеств). Задача формулируется как задача математического программирования транспортного типа [5]. Необходимость решения данной задачи возникает при наличии «потерянных» объектов либо при желании оценить качество решения задачи разбиения.

Решение задачи разбиения для примера на рис. 2 с заданными параметрами $C=4, [a,b]=[3,5]$ приводит к разложению $(4,4,4,4)$. После формирования $Q(3)$, построения и анализа графа $G(3)$, выделяются три ЕС (три компоненты связности). Две из них $(7,9,10)$ и $(8,14,15,16)$ укладываются в интервал и заносятся в разложение, замещая два последних элемента. В результате корректировки получается новое разложение $(4,5,3,4)$. На рис. 4 приведены результаты разрезания графа $G(3)$ для размерностей блоков матрицы-шаблона, соответствующих элементам скорректированного разложения. Справа и снизу матрицы приведены номера объектов, вошедших в блоки, которые соответствуют подмножествам разбиения.

●	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1			3	3	2												1
2	3			3	2												2
3	3	3			2												3
4	2	2	2				1										6
5							1	3	2	3							5
6				1	1		1	1	1								11
7					3	1		2	3								4
8					2	1	2		2								13
9					3	1	3	2									12
10											3	3					10
11										3		3					7
12										3	3						9
13													2	2	2		8
14													2		3	3	14
15													2	3		3	15
16													2	3	3		16
	1	2	3	6	5	11	4	13	12	10	7	9	8	14	15	16	

Рис. 4. Результат разрезания графа $G(3)$

При назначении параметров $C=3$ и $[a,b]=[4,7]$ получим разложение $(5,5,6)$. Граф $G(4)$, построенный для $Q(4)$, состоит из двух ЕС. Одно из них $(7,8,9,10,14,15,16)$ укладывается в интервал, второе разрезается согласно скорректированному разложению $(4,5,7)$. Оба варианта решения задачи разбиения не приводят к появлению «потерянных объектов».

Программная реализация перечисленных этапов решения задачи разбиения предполагает более детальную алгоритмизацию этапов и в ряде случаев интерактивное вмешательство пользователя. Необходимость вмешательства возникает при выборе величины g , выделении ЕС и скоплений

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погребной Ал.В., Погребной Ан.В. Алгоритм решения задачи компактного разбиения множества объектов территориально распределенной системы // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 22–28.
2. Погребной Ал.В. Определение нижней границы оценки компактности для топологических разбиений // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 27–32.
3. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978. – 432 с.

на основе функции $F(g)$ или графа $G(g)$, применении алгоритмов решения задачи подключения объектов к центрам и в ряде других случаях.

Выводы

1. Замена объектов на компактные множества и соответственно отношений между объектами в виде расстояний на отношения между компактными множествами в виде мощностей парных пересечений усиливает эффект локализации скоплений объектов на топологическом поле.
2. Использование эффекта локализации скоплений и введение функции плотности и графа парных пересечений позволило разработать эффективный инструмент выделения скоплений. На топологическом поле скопления могут присутствовать изначально в автономном виде (естественные скопления) или как скопления объектов, которые относительно своего ближайшего окружения выделяются большей плотностью (относительные скопления).
3. При наличии инструмента выделения скоплений задача разбиения множества объектов на подмножества в заданном интервале мощностей в основном сводится к нахождению максимального соответствия между скоплениями и подмножествами с учетом их числа и допустимой мощности.
4. Понятие скопления, введенное в данной статье, остается малоизученным. Исследование свойств скоплений и введение соответствующих оценок позволит в последующем разработать алгоритмы решения задач разбиения с учетом конкретных требований для других практических приложений.

Работа выполнена в рамках госзадания «Наука»

4. Погребной Ан.В., Погребной Д.В. Исследование матричного алгоритма решения задачи разрезания графов // Молодежь и современные информационные технологии: Труды VIII Всероссийского научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2010. – С. 140–148.
5. Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б. Задачи линейного программирования транспортного типа. – М.: Наука, Физматлит, 1969. – 384 с.

Поступила 27.09.2012 г.

УДК 004.415.5:004.896

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДАННЫХ

А.В. Кудинов

Томский политехнический университет

E-mail: KudinovAV@tpu.ru

Предложена оригинальная технология решения задач интеллектуального анализа производственных данных промышленных предприятий. Описана концепция создания такой технологии, включая типовую архитектуру VI-системы, подходы к проектированию и реализации центрального хранилища производственных данных, тематических витрин данных, а также способ реализации моделей анализа производственных данных на основе технологии Data Mining. Приведен пример решения прикладной задачи анализа на реальных данных промышленного предприятия.

Ключевые слова:

Аналитическая обработка данных, интеллектуальный анализ данных, хранилища данных, информационно-аналитические системы.

Key words:

On-line analytical processing, data mining, data warehouses, business intelligence.

Введение

При автоматизации любого производственного бизнес-процесса наступает этап, когда проблемы сбора данных, первичные учетные и оперативные задачи уже, в целом, решены, накоплен достаточный массив информации и на первый план выходят проблемы анализа этих данных. При этом анализ необходим как для решения повседневных задач (например, прогнозов необходимости ремонта оборудования по его состоянию или необходимости закупки тех или иных запчастей или материалов в зависимости от степени их текущего использования), так и для определения стратегического направления развития компании в целом.

Таким образом, актуальной становится задача выбора подходящих средств для анализа и поддержки процесса принятия решений. В этом случае традиционно применяются такие инструменты, как *хранилища данных* (Data Warehouses, ХД) и построенные на их основе *системы бизнес-анализа данных* (Business Intelligence, BI), в российской научной литературе более известные как *информационно-аналитические системы* или *системы поддержки принятия решений*. Фундаментом средств бизнес-аналитики являются технологии OLAP и Data Mining [1, 2].

Традиционными сферами применения вышеперечисленных технологий является анализ экономической (финансовой) информации. В то же время, растет интерес к BI, технологиям OLAP и Data Mining в социальной сфере (образование, медицина, государственное управление и т. д.), а также в промышленности (особенно в крупной — энергетика, металлургия, нефтехимия, нефтегазодобыча) [2–5]. Причем в сфере их внимания оказывается не только решение задач финансово-экономического анализа, так или иначе актуальных для всех предприятий и организаций, но и к решению сугубо специфичных, отраслевых аналитических задач.

При этом недостаточно развитой остается теоретическая база, связанная с научным обосновани-

ем создания систем анализа производственных данных. Большинство исследователей сосредоточено либо на решении конкретных прикладных задач отдельных отраслей и компаний, либо, наоборот, на определении возможности использования конкретных групп аналитических методов для широкого круга производственных задач. Из работ зарубежных исследователей можно выделить монографии [3, 4], представляющие наиболее полные аналитические обзоры методов прикладной математики для решения задач управления производственными процессами различных отраслей. Из работ российских исследователей можно отметить [6–8], посвященные развитию методов и созданию прикладных систем для решения аналитических задач для нефтеперерабатывающих производств.

К сожалению, часто за границами внимания исследователей остаются важные проблемы применения интеллектуального анализа в промышленности, связанные с недостаточной квалификацией пользователей и сложностью разработки типовых решений, универсальных для целых групп отраслей. По мнению авторов, снять остроту вышеперечисленных проблем и снизить издержки при разработке и внедрении систем бизнес-анализа в производстве может создание комплексной *информационной технологии для решения задач интеллектуального анализа производственных данных*.

Концепция создания технологии решения задач интеллектуального анализа производственных данных

Можно выделить следующие аспекты, усложняющие разработку и внедрение систем интеллектуального анализа в производственной деятельности промышленных предприятий:

- 1) слабая готовность пользователей к применению сложных математических методов;
- 2) высокая стоимость и длительные сроки внедрения VI-систем;

- 3) сложность масштабирования таких систем либо для решения новых задач, либо при их адаптации к изменяющейся производственной ситуации.

Рассмотрим эти аспекты более подробно.

Наиболее серьезной проблемой внедрения VI-систем в производстве, на наш взгляд, является сложность для конечных пользователей как математического аппарата и программных средств анализа, так и инструментов для визуализации их результатов. Большинство известных аналитических методов и популярных инструментов оперируют концепциями, далекими от задач предметной области. Даже квалифицированный геолог или технолог не сможет сразу найти соответствие между актуальной для него производственной задачей и определенным классом задач анализа (кластеризацией, ассоциацией, анализом отклонений или последовательностей), не говоря о том, чтобы выбрать подходящий метод (алгоритм) решения, подобрать его параметры и затем правильно интерпретировать качество решения задачи, основываясь на предлагаемых статистических характеристиках результатов.

С другой стороны, специалисты по анализу данных, имеющие необходимую квалификацию для его проведения, не всегда являются специалистами в предметной области. Таким образом, они не способны как к выявлению места аналитических задач в производственных бизнес-процессах, так и обоснованному оперированию параметрами методов и, в конечном итоге, к правильной интерпретации результатов с точки зрения их полезности для бизнеса. В этой связи «идеальным» пользователем такой системы будет высококвалифицированный специалист, сочетающий в себе знания методов и инструментов анализа и опыт решения прикладных задач в предметной области. Именно такие специалисты наиболее востребованы в традиционных для VI сферах применения, таких как экономический, финансовый анализ и др. Многие компании создают даже специальные аналитические службы, работающие в интересах бизнеса в целом. Однако в производственной сфере найти или подготовить аналитиков, способных также работать на стыке нескольких технических специальностей, гораздо сложнее.

Нам представляется более продуктивным другой подход, согласно которому для полноценного использования методов и технологий интеллектуального анализа в производственной сфере необходимо найти способ приблизить данные технологии к потребностям конкретных специалистов. Данная проблема усугубляется тем, что разработка информационно-аналитических систем и проектирование архитектуры хранилища данных сами по себе являются сложными, дорогостоящими и длительными процессами. Типичный проект внедрения VI-системы (по данным исследователей) имеет продолжительность от 0,5 до 2 лет и стоимость от 0,4 до 1,5 млн долларов [9]. Поэтому очевидно вос-

требуемыми на рынке являются типовые решения в этой области, которые аккумулируют опыт разработки и внедрения систем такого рода на десятках и даже сотнях предприятий. К сожалению, сравнительно легкой типизации поддается, в основном, решение аналитических задач, общих для большинства компаний и относящихся, опять же, к традиционным для VI сферам применения: финансовый анализ, анализ рынков, управление персоналом и т. д. Примеров создания и внедрения VI-систем, решающих задачи анализа производственных процессов, настолько мало, что говорить о типовых отраслевых решениях пока рано, хотя актуальность их разработки не вызывает сомнений.

На первом этапе создания технологии решения задач интеллектуального анализа производственных данных необходимо очертить круг собственно аналитических задач, актуальных при управлении производством.

Задачи анализа производственных данных

Сформировать общее видение концепции VI-системы компании и тем более применять разработанные VI-средства невозможно без четкого видения аналитических задач, необходимых как для предприятия в целом, так и для отдельных его подразделений. В работе [8] приведен следующий перечень классов задач для анализа производственных (технологических) ситуаций, связанных с обнаружением и прогнозированием скрытых тенденций и закономерностей развития производственных процессов, выявлением скрытых факторов влияния и взаимосвязей между производственными параметрами, а также оптимизацией управления производственными процессами и визуализацией результатов анализа. В работе [2] этот перечень дополняется такой задачей, как прогнозирование качества изделия в зависимости от некоторых параметров технологического процесса. Также там отмечается, что природа технических процессов достаточно стабильна и их отклонения должны лежать в некоторых определенных пределах, что облегчает проведение некоторых видов анализа этих процессов.

При создании VI-систем для определенных отраслей и производств важно конкретизировать и группы аналитических задач. Обычно они соответствуют задачам определенных групп специалистов (диспетчеров, технологов, механиков и т. д.). Практически идентичной является существенная часть функций, методов работы и используемых данных для целого ряда производственных служб промышленных предприятий различных отраслей. Такая унификация объясняется, в частности, тем, что задачи, методы работы, формы используемых документов каждой службы определяются, в значительной степени, не отраслевой спецификой, а нормами государственного технического контроля и другими общепринятыми нормами и регламентами. В этой связи, нет существенных отличий

между работой службы главного механика, например, металлургического, нефтехимического производства и газодобывающих компаний (ГДК). То же самое относится и к функциям служб главного метролога, энергетика, связиста и т. д. Соответственно в значительной степени инвариантны к отраслевой специфике и аналитические задачи, решаемые этими службами.

Например, газовая отрасль специфична как по своей области знаний, так и по особенностям анализируемых данных, поэтому для определения целей анализа и постановки задач необходим четко проработанный анализ предметной области. Таким образом, можно сформулировать общие и частные аналитические задачи, актуальные при управлении производством ГДК. К общим производственно-аналитическим задачам, решаемым на основе данных всего предприятия, мы предлагаем отнести анализ:

- эффективности выполнения основных и вспомогательных бизнес-процессов;
- режимов работы основного и вспомогательных производств (разведка и бурение, добыча, подготовка/переработка, транспортировка), в том числе выявление аномальных режимов, прогноз и оптимизация;
- выполнения производственных планов и достижения основных производственных показателей, в том числе на основе систем KPI, BSC и т. д.;
- состояния производственного оборудования, в том числе для оптимизации управления его ремонтами;
- планов развития производственной базы;
- эффективности использования ресурсов в производстве, в том числе анализ эффективности системы материально-технического снабжения;

- качества сырья и продукции;
- квалификации и эффективности работы производственного персонала.

Разработка типовой архитектуры BI-системы

Создание технологии решения аналитических задач подразумевает разработку типовой архитектуры BI-системы для анализа производства, ее математического и программного обеспечения, а также методологий ее внедрения и сопровождения.

В основе архитектуры предлагается использовать классический подход к построению BI-системы, предполагающий создание как центрального хранилища данных, так и структур более мелких витрин данных, предназначенных для решения аналитических задач отдельных подразделений или групп специалистов предприятия. При этом данные центрального хранилища должны накапливаться непрерывно в процессе производства в течение долгого периода времени. Они представляют собой квинтэссенцию опыта специалистов предприятия, сосредоточение знаний о характере протекания производственных процессов, что делает их неоценимой основой для поддержки принятия управленческих решений, оптимизации производственных процессов в масштабах всего предприятия и пр. Для решения частных аналитических задач отдельных групп специалистов огромный массив данных всего предприятия требуется декомпозировать на подмножества данных витрин. На рис. 1 приведена предложенная общая архитектура BI-системы для анализа производства. Ее главным элементом является центральное хранилище производственных данных (ЦХПД), источниками данных которого являются различные транзакционные системы, так или иначе оперирующие производственно-технологическими данными. Поступление данных из источников управляется инте-

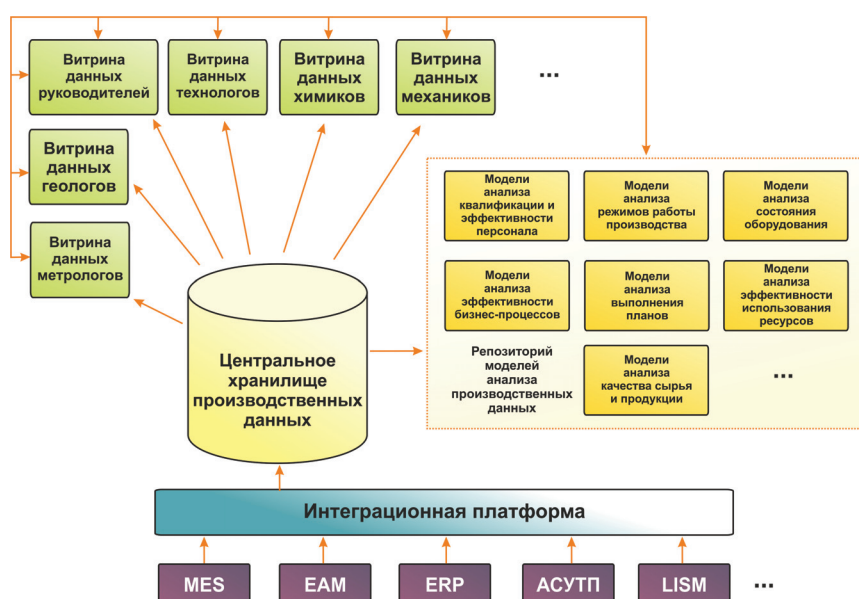


Рис. 1. Общая архитектура BI-системы для анализа производства

грационной платформой, подробно описанной в работе [10].

Функции системы доступны ее пользователям через тематические витрины данных, ряд задач которых решается на основе моделей из общего репозитория моделей анализа производственных данных. Основным принципом предложенной архитектуры является легкая масштабируемость. Изменение состава и структуры источников данных, появление новых аналитических задач не должно оказывать существенного влияния на структуру центрального хранилища данных и существующих тематических витрин данных. Модели данных как центрального хранилища, так и витрин, должны быть максимально инвариантны к особенностям конкретных предприятий, источников данных и программных платформ.

С точки зрения практической реализации предложенной архитектуры, можно рекомендовать использование любой современной BI-платформы, такой как Oracle BI Suite, Microsoft SQL Server Analyses Services, SAP BusinessObjects BI Platform и др. В данной работе использовалась платформа Microsoft SQL Server 2008 Analyses Services [1], поэтому описание приведенных примеров выполнено с использованием некоторых терминов, концепций и элементов интерфейса именно этого продукта.

При проектировании структуры центрального хранилища производственных данных (ЦХПД) преследуются следующие основные цели:

- 1) организовать легкое поступление данных в хранилище из учетных систем;
- 2) организовать легкую выборку данных из хранилища для тематических витрин;
- 3) по возможности абстрагироваться в структуре хранилища от отраслевых особенностей;
- 4) организовать анализ данных непосредственно в хранилище, безотносительно функциональных и даталогических рамок, определяемых интересами конкретных групп пользователей (служб) и задаваемых структурами данных и функциями соответствующих витрин;
- 5) обеспечить возможность легкого масштабирования хранилища при появлении новых учетных систем, витрин и аналитических задач.

Поскольку существуют принципиальные различия в проектировании структур хранилищ данных и транзакционных (учетных) систем [9], то первая и вторая цель фактически противоречат друг другу. Поэтому можно предложить использовать подход, применяемый при создании *оперативных складов данных*, служащих технологическим буфером между учетными системами и хранилищами данных. В соответствии с этим подходом, создают гибридную структуру, позволяющую, с одной стороны, учесть максимум фактических данных учетных систем с той же (по возможности) детальностью и атрибутивной полнотой, а с другой стороны, определить для этих данных модели агрегации, эквивалентные соответствующим моделям хранилищ (витрин) данных. При этом мы предлага-

ем группировать фактические данные в хранилище по типам производственных данных, т. е. выделить плановую, паспортную, оперативно-технологическую, пространственную и иную информацию в отдельные кубы данных. Таким образом, достигаются и цели абстрагирования от особенностей предметной области, и относительно легкого масштабирования структуры ЦХПД. Кроме того, группировка по типам производственной информации позволяет проводить на этих данных недетерминированный, разведочный их анализ, что также является одной из обозначенных нами целей. Необходимо отметить, что такой принцип построения ЦХПД не позволяет применять его конечными пользователями в качестве легкого инструмента для решения повседневных прикладных задач анализа, т. к. его структура в большей степени определяется особенностями управления данными, чем задачами и объектами конкретной предметной области.

Витрина данных и названа так потому, что разворачивает информацию и функции BI-системы лицом к конечному пользователю. Поэтому основными требованиями к ее функциям и структуре ее данных являются простота понимания и использования. Для именованной структуры данных витрины необходимо использовать термины предметной области. То же требование можно отнести, по возможности, и к структурам и моделям анализа данных (*Data Mining Structures* и *Data Mining Models*), используемым витриной (в предлагаемой нами архитектуре они вынесены в отдельный репозиторий моделей анализа). Так, для витрины геолого-промысловых данных фактами будут результаты исследований скважин, объемы извлечения сырья, данные о ходе бурения, факты остановок скважин и проведения геолого-технических мероприятий. Измерениями, соответственно, будут объекты разработки (месторождения, пласты, блоки, скважины, кусты скважин) и время.

Разработка моделей анализа производственных данных и примеры решения прикладных задач анализа

В качестве методологической основы для разработки моделей анализа производственных данных мы предлагаем использовать широко известную методологию CRISP-DM [11]. В качестве отличительной черты предлагаемой в данной работе технологии можно отметить широкое использование шаблонов, как инструмента для масштабирования BI-системы в условиях возникновения новых аналитических задач, а также репозитория моделей анализа, как важного элемента архитектуры системы. Соответственно, шаблоны позволяют легко решать новые аналитические задачи на основе уже реализованных задач аналогичного класса (но, например, отличающихся областью данных), а общий репозиторий позволяет использовать эти шаблоны различными производственными службами, не ограничиваясь рамками тематических витрин.

В качестве примера решения прикладной задачи анализа производственных данных при помощи предложенной технологии приведем результаты исследования по выявлению ассоциативных связей между возникновением недостоверных данных измерительных устройств и их характеристиками. Моделирование выполнялось на основе реальных данных архива технологических параметров MES «Магистраль-Восток», внедренной в ОАО «Востокгазпром» [12]. Для технологического процесса нефтегазодобычи характерно наличие возмущений и искажений в значениях технических параметров, контролируемых при помощи автоматизируемых систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Это обусловлено динамикой электрических процессов, происходящих в агрегатах на объектах нефтедобычи. Случайные паразитные явления, такие как механические вибрации, образование газовых скоплений, неоднородность закачиваемого вещества в реальной ситуации оказываются причиной появления пиков и пульсаций в замерах технологических параметров. При сборе технологических данных от АСУ ТП по протоколу OPC (OLE for Process Control) соответствующий OPC-сервер может возвращать вместе со значением самого технологического параметра также значение атрибута *Достоверность техпараметра* (как одного из состояний – *Good*, *Bad* или *Uncertain*). Для ГДК общее число технологических параметров может составлять до нескольких десятков тысяч, причем исторический архив

может содержать до нескольких миллионов значений каждого параметра. Для отдельных параметров техпараметра возможно посчитать количество значений с *Bad* достоверностью, соотнести это количество к общему количеству всех обработанных значений (*Bad*, *Good*, *Uncertain*), т. е. создать оценку доли недостоверных значений в общем количестве значений параметра. Таким образом, задачей является выявление сочетания таких классификационных признаков, которые помогают определить проблемные места, используя VI-средства.

В результате в качестве классификационных признаков технологических параметров были выбраны: название АСУ ТП, тип параметра (давление, температура, расход и т. д.), тип объекта-источника параметра (насосы, задвижки, емкости и т. д.). Была построена модель анализа, использующая упрощенный алгоритм Байеса и алгоритм дерева решения. Результаты моделирования при помощи обоих алгоритмов совпали и показывают, что порядка 80 % всех недостоверных значений дают параметры, контролируемые датчиками температуры АСУ ТП «RS3», установленными на техпозициях насосов Мыльджинской УКПГ. После сужения области поиска было решено провести расширенное исследование и выявить корреляцию между количеством отказов данного типа датчиков и их паспортными характеристиками (дата выпуска, завод-изготовитель, дата ввода в эксплуатацию и т. д. – всего несколько десятков атрибутов).

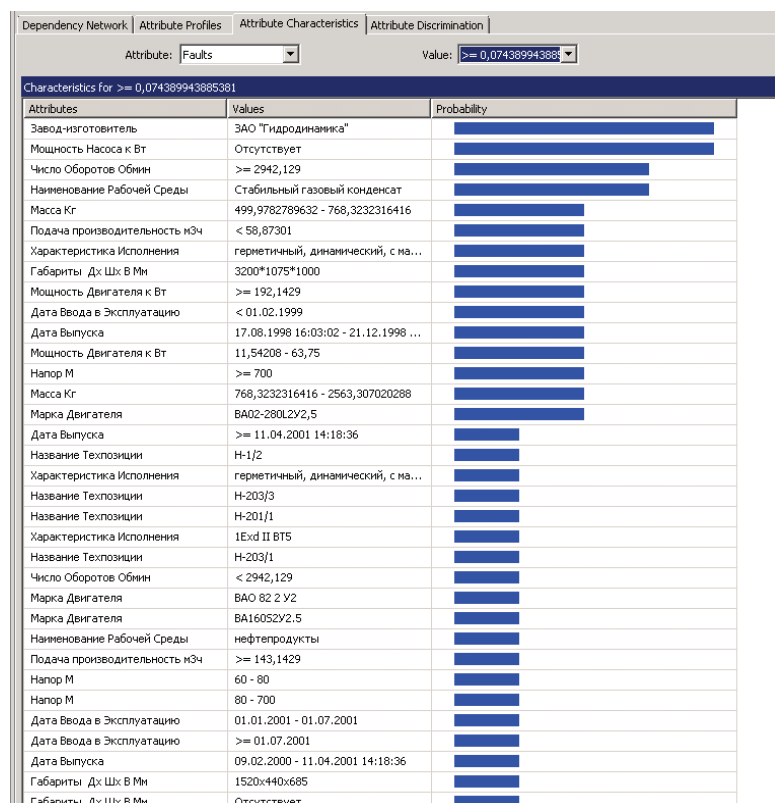


Рис. 2. Результаты анализа характеристик средств измерения

При моделировании также использовался упрощенный алгоритм Байеса. Результатами стало выделение такого набора классификационных признаков, который указывал на наибольшую вероятность появления недостоверных значений параметров. В частности выяснилось, что наиболее вероятен отказ датчиков температуры, выпущенных ЗАО «Гидродинамика» в определенный период (рис. 2). Таким образом, можно говорить о статистически подтвержденном факте обнаружения бракованной партии средств измерений, что служит основой для принятия решений специалистами службы главного метролога предприятия. Оценка точности моделирования, выполненная также при помощи средств Microsoft SQL Server 2008 Analyses Services, показала высокую достоверность его результатов. В дальнейшем планируется на основе созданной модели анализа реализовать постоянно действующую модель, пересчет которой бы осуществлялся автоматически при поступлении новых данных с систем нижнего уровня, а нотификация пользователей о найденных результатах выполнялась бы посредством рассылки отчета по электронной почте.

Выводы

Рассмотрена информационная технология для решения широко спектра задач интеллектуального анализа производственных данных промышленного предприятия. Ее основным преимуществом яв-

ляется ориентированность на создание типовых решений для целых отраслей и групп отраслей промышленности. В частности показано, как при проектировании архитектуры ВІ-системы унифицировать структуру центрального хранилища производственных данных, а также как проектировать структуры витрин данных для конкретных групп специалистов. Предложен подход к решению аналитических производственных задач на основе шаблонов, а также показаны преимущества введения такого элемента архитектуры ВІ-системы, как единого репозитория моделей анализа.

Рассмотрены результаты применения данной технологии при разработке и внедрении прикладных систем анализа для предприятий газовой отрасли и при решении конкретных аналитических задач производственных служб газодобывающей компании. Так, проведенное исследование по выявлению ассоциативных связей между возникновением недостоверных данных измерительных устройств и их характеристиками показало способность созданных моделей к выявлению партий бракованных датчиков. Проведенное исследование является классическим примером применения технологии Data Mining, т. к. осуществлялась не статистическая проверка заранее сформулированной гипотезы, а поиск нового знания о предметной области в огромном массиве первичных данных.

Работа выполнялась по тематике госбюджетной НИР в рамках государственного задания «Наука».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Макленнен Дж., Танг Чж., Криват Б. Microsoft SQL Server 2008: Data Mining – интеллектуальный анализ данных / Пер. с англ. А. Лашкевича. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 720 с.: ил.
- Чубукова И.А. Data Mining. 2-е изд., испр. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 382 с.: ил.
- Feldman R., Curry G.G. Manufacturing Systems Modeling and Analysis. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – 335 p.
- Wang Jun. Computational Intelligence in Manufacturing Handbook. – Boca Raton: CRC Press LLC, 2001. – 560 p.
- Попова М. Во что вложится нефтегаз? Мнения ИТ-экспертов. URL: http://www.3dtv.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=73&lang=ru (дата обращения: 20.01.2012).
- Гершберг А.Ф., Мусаев А.А., Нозик А.А., Шерстюк Ю.М. Концептуальные основы информационной интеграции АСУ ТП нефтеперерабатывающего предприятия. – СПб.: Альянс-Строй, 2003. – 128 с.
- Гершберг А.Ф. Интеграция и интеллектуализация АСУ ТП нефтеперерабатывающего предприятия. – СПб: ПО «Киршинефтеоргсинтез», 2001. – 52 с.
- Мусаев А.А. Алгоритмы аналитического управления производственными процессам // Автоматизация в промышленности. – 2004. – № 1. – С. 30–35.
- Туманов В.Е. Проектирование хранилищ данных для систем бизнес-аналитики. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 615 с.: ил.
- Veyber V., Kudinov A., Markov N. Model-driven platform for oil and gas enterprise data integration // International Journal of Computer Applications. – 2012. – № 49 (5). – P. 14–19.
- Azevedo A., Santos M.P. KDD, SEMMA and CRISP-DM: A parallel overview // IADIS European Conference Data Mining. – Amsterdam, 2008 July 24–28. – P. 182–185.
- Богдан С.А., Кудинов А.В., Марков Н.Г. Опыт внедрения MES «Магистраль-Восток» в нефтегазодобывающей компании // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 8. – С. 53–58.

Поступила 19.09.2012 г.

УДК 519.688:622.276.5.001.42

АДАПТИВНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СИСТЕМЕ «ПЛАСТ–СКВАЖИНА» МЕТОДОМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ

К.С. Гаврилов, В.Л. Сергеев

Томский политехнический университет

E-mail: SergeevVL@ignd.tpu.ru

Рассматриваются проблемы повышения информативности методов интерпретации нестационарных гидродинамических исследований в системе «пласт–скважина», и предлагается подход к их решению, основанный на использовании метода интегрированных моделей и метода адаптивной интерпретации. Приводятся примеры, показывающие преимущества предлагаемого подхода.

Ключевые слова:

Интерпретация, идентификация, гидродинамические исследования скважин, априорная информация, нефтяные пласты.

Key words:

Interpretation, identification, hydrodynamic analysis of oil wells, a-priori information, oil pools.

Введение

Нестационарные гидродинамические исследования скважин (ГДИС) являются наиболее информативным методом определения коллекторских и геометрических параметров пластов нефтяных и газовых месторождений. Они обеспечивают получение важнейших параметров залежей, на основании которых осуществляются процессы добычи нефти, составляются технологические проекты разработки месторождений, создаются геолого-технологические модели процессов нефтегазодобычи.

Существенным недостатком традиционных методов идентификации и интерпретации ГДИС является их затратный характер, поскольку интерпретация результатов производится после завершения заранее спланированных исследований, что часто приводит к продолжительным простоям скважин, значительной потере добычи углеводородов [1].

Однако в настоящее время, в связи с возможностью получения информации в режиме реального времени стационарными измерительными системами, требуется иная технология, позволяющая определять фильтрационные параметры и энергетическое состояние залежей в процессе гидродинамических исследований, не планируя заранее время их завершения [2].

С другой стороны, для повышения информативности, обеспечения устойчивости и повышения точности методов интерпретации ГДИС, как отмечалось рядом авторов, требуется интеграция информации о параметрах пласта и скважины [2–4]. Одним из перспективных способов интеграции информации, зарекомендовавшим себя при решении ряда практических задач мониторинга и управления разработкой нефтяных месторождений, является технология интегрированных моделей, которая позволяет объединить исходные данные, дополнительные априорные сведения, накопленный опыт и знания в единую систему моделей, что обеспечивает устойчивость оценок и существенно повышает их точность.

В данной работе на основе метода интегрированных моделей [4] и метода адаптивной идентификации [3] предлагаются и исследуются модели и алгоритмы, позволяющие проводить интерпретацию нестационарных ГДИС в процессе поступления информации, наиболее полно учитывать дополнительные априорные данные и экспертные оценки о параметрах пласта и скважины

Технология адаптивной интерпретации гидродинамического исследования скважин в системе «пласт–скважина»

Основой алгоритмов адаптивной интерпретации нестационарных ГДИС в системе «пласт–скважина» является стохастическая интегрированная система моделей вида:

$$\begin{cases} P_{3,n}^* = P_3(t_n, \alpha_n, q) + \xi_n, \\ \bar{P}_{nl} = P_3(T, \alpha_n, q) + \eta_n, \Gamma \bar{\alpha}_l = \Gamma \alpha_n + \nu_{nl}, l = \overline{1, p}, \\ \bar{V} = V(T, G \alpha_n) + \varepsilon_n, n = \overline{1, n_k}, \end{cases} \quad (1)$$

где $P_{3,n}^*$, $P_3(\alpha_n, q_n)$ – векторы фактических значений забойных давлений в текущий момент времени t_n и вычисленные на основе модели КВД f_3 , заданной с точностью до параметров $\alpha_n = (\alpha_{n1}, \alpha_{n2}, \alpha_{nm})$; \bar{V}_n , $V(t_n, G \alpha)$ – экспертная оценка накопленной жидкости в стволе скважины после ее остановки, вычисленная на основе модели $V(T, G \alpha)$; \bar{P}_{nl} , $\Gamma \bar{\alpha}_l$ – векторы дополнительных априорных данных о пластовом давлении и фильтрационных параметрах пласта (полученных из ранее проведенных ГДИС, геофизических исследований скважин, лабораторных исследований керна и т. п.); Γ , G – диагональные индикаторные матрицы нулей либо единиц (символ «0» используется для указания отсутствующих элементов векторов параметров $\bar{\alpha}$, α); T – время максимальной длительности исследований скважины, гарантированное для восстановления в скважине пластового давления ($T \approx 3t_n$); ξ_n , η_n , ν_{nl} , ε_n – векторы случайных величин, представляющих погрешности измерений забойных давлений, дебита притока продукции в скважине, ошибки допол-

нительных данных и экспертных оценок, неточность моделей и т. п.

Технологию адаптивной идентификации и интерпретации ГДИС по кривой восстановления давления (КВД), основанную на методе интегрированных моделей, можно представить как процесс принятия решений, содержащий этапы:

1) формирование исходных данных, дополнительных априорных сведений, экспертных оценок, выбор модели КВД в рамках системы моделей (1)

$$\{P_{3,n}^*, \bar{P}_{nn}, \bar{\alpha}_l, l = \overline{1, p}, \bar{V}_n, P_3(\alpha_n, q_n), n = \overline{1, n_k}\}; \quad (2)$$

2) выбор показателя качества системы моделей (1) и решение оптимизационных задач вида

$$\alpha_n^*(\beta_n) = \arg \min_{\alpha_n} \Phi(\alpha_n, \beta_n), n = \overline{1, n_k}, \quad (3)$$

$$\beta_n^* = \arg \min_{\beta_n} J_0(\alpha_n^*(\beta_n)), \quad (4)$$

где запись $\arg \min f(x)$ означает точку минимума x^* функции $f(x)$ ($f(x^*) = \min f(x)$); $\Phi(\alpha_n, \beta_n) = \Phi(J_0(\alpha_n), \beta_k, J_k(\alpha_n), k = \overline{1, p})$ – комбинированный показатель качества системы моделей КВД (1), представляющий заданную функцию (функционал) Φ от частного показателя качества $J_0(\alpha_n)$ модели КВД и от взвешенных весами β_n частных показателей качества $J_k(\alpha_n)$ моделей дополнительных априорных данных и экспертных оценок;

3) анализ точности полученных приближений и принятие решения о прекращении либо о продолжении исследований с возвратом к этапу (2), либо (1).

Решение о прекращении исследований может быть принято на основе визуального анализа графика зависимости оценок параметров пласта и скважины (3) от времени либо по критерию стабилизации полученных приближений, где, например, за момент их завершения n_k принимается то значение n , при котором выполняется неравенство

$$\left| (\alpha_{j,(n-i)}^* - \alpha_{jn}^*) / \alpha_{nj}^* \right| \leq \varepsilon_j, j = \overline{1, m}, i = 1, 2, 3, \dots$$

(ε_j – заданная точность) (5)

Предлагаемая технология (2)–(5) позволяет синтезировать достаточно широкий спектр алгоритмов адаптивной идентификации и интерпретации ГДИС для линейных, нелинейных и непараметрических моделей КВД и моделей объектов аналогов [4].

Отметим, что для нелинейной модели КВД при выборе комбинированного показателя качества в виде суммы частных квадратичных показателей качества

$$\Phi = \left\| P_{3,n}^* - P_3(t_n, \alpha_n, q) \right\|_{W^2}^2 + \beta_1 \left\| \bar{P}_{nn} - P_3(T, \alpha, q) \right\|^2 + \beta_2 \left\| \Gamma \bar{\alpha}_l - \Gamma \alpha \right\|^2 + \beta_3 \left\| \bar{V} - V(T, G\alpha) \right\|^2 \quad (6)$$

оптимизационная задача (3) с использованием метода Гаусса–Ньютона сводится к последовательно-

му решению системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \alpha_n^i = \alpha_n^{i-1} + h_{i,n} \Delta \alpha_n^{i-1}, & i = 1, 2, 3, \dots, \\ A^{i-1} \cdot \Delta \alpha_n^{i-1} = B^{i-1}, \end{cases} \quad (7)$$

где запись $\|X\|_{W^2}$ означает квадратичную форму;

$$A^{i-1} = (D_3^T W D_3 + \beta_1 D_{nn}^T D_{nn} + \beta_2 D_v^T D_v + \beta_3 I)^{i-1},$$

$$B^{i-1} = (D_3^T W e_3 + \beta_1 D_{nn}^T \bar{e}_{nn} + \beta_2 D_v^T \bar{e}_v + \beta_3 \Delta \bar{\alpha})^{i-1},$$

$$D_3 = \left(\frac{\partial P_3(t_i, \alpha, q)}{\partial \alpha_j}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m} \right),$$

$$D_{nn} = \left(\frac{\partial P_3(T, \alpha)}{\partial \alpha_j}, j = \overline{1, m} \right),$$

$$D_v = \left(\frac{\partial V(T, G\alpha)}{\partial \alpha_j}, j = \overline{1, m} \right)$$

– матрица и векторы частных производных от моделей КВД, пластового давления и накопленной добычи жидкости;

$$e_3 = (P_3^* - P_3(\alpha)), \quad \bar{e}_{nn} = (\bar{P}_{nn}^* - P_3(T, \alpha)),$$

$$\Delta \bar{\alpha} = (\Gamma \bar{\alpha}^* - \Gamma \alpha), \quad \bar{e}_v = (\bar{V}^* - V(T, G\alpha))$$

– векторы и переменные невязок; \bar{P}_{nn}^* , $\Gamma \bar{\alpha}^*$, \bar{V}^* – усредненные значения дополнительных априорных данных и экспертных оценок пластового давления, фильтрационных параметров пласта и накопленной добычи продукции; $W = \text{diag}(w(n), n = \overline{1, n_k})$ – диагональная матрица весовой функции $w(t)$, определяющая вес забойного давления $P_{3,n}^*$ в текущий момент времени t_i ; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – управляющие параметры. Для получения (7) достаточно взять частные производные по параметрам α_n от комбинированного функционала (6) и приравнять их к нулю.

Следует также отметить, что задача (4) по определению оптимальных значений вектора управляющих параметров β_n^* не имеет аналитического решения и решается методами последовательных приближений.

Результаты идентификации и интерпретации

Результаты идентификации и интерпретации ГДИС скважины № 335 однородно-пористого нефтяного пласта месторождения Тюменской области на неустановившихся режимах фильтрации по КВД приведены на рис. 1–3 и в таблице. В качестве модели КВД использована зависимость $P_3(t)$, позволяющая учитывать приток продукции в скважину после ее остановки [1]:

$$P_3(t) = P(t_0) + \frac{1}{4\pi\sigma} \int_{t_0}^t \frac{(q_0 - q(\tau))}{t - \tau} \exp\left(-\frac{1}{k_p(t - \tau)}\right) \cdot d\tau, \quad (8)$$

где q_0 – дебит скважины до ее остановки; $q(\tau)$ – модель дебита притока продукции в скважину после ее остановки; $P_3(t_0)$ – забойное давление в момент остановки скважины t_0 ; $\sigma, k_p = 4\chi/r_{np}^2$ – гидропроводность нефтяного пласта и комплексный параметр;

r_{np} , χ – приведенный радиус скважины и проницаемость пласта.

На рис. 1 приведены значения забойного давления $P_{3,n}$, ат, и дебита притока продукции в скважине q_n , м³/сут.

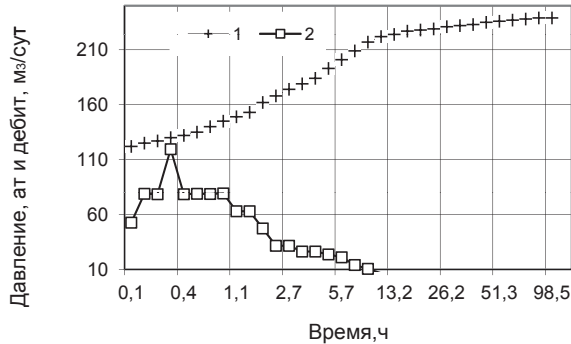


Рис. 1. Значения забойного давления (1) и дебита притока (2)

Обработка результатов ГДИС проводилась с использованием программных комплексов PanSystem, Saphir, адаптивного метода интегрированных моделей (7), адаптивного метода наилучшего совмещения, который, по аналогии с (7), сводится к последовательному решению системы линейных уравнений вида

$$\begin{cases} \alpha_n^i = \alpha_n^{i-1} + h_{i,n} \Delta \alpha_n^{i-1}, & i = 1, 2, 3, \dots, \\ (D_3^T W D_3)^{i-1} \cdot \Delta \alpha_n^{i-1} = (D_3^T W e_3)^{i-1}, \end{cases} \quad (9)$$

и адаптивного метода интегрированных моделей с учетом априорной информации о фильтрационных параметрах пласта (АМИМ_1)

$$\begin{cases} \alpha_n^i = \alpha_n^{i-1} + h_{i,n} \Delta \alpha_n^{i-1}, & i = 1, 2, 3, \dots, \\ (D_3^T W D_3 + \beta D_v^T D_v)^{i-1} \Delta \alpha_n^{i-1} = \\ = (D_3^T W e_3 + \beta D_v^T e_v)^{i-1}, \end{cases} \quad (10)$$

который следует из (7) при $\beta_2 = \beta_3 = 0$.

Оценки гидропроводности $\sigma_n^* = \alpha_1^*(\beta)$, комплексного параметра $k_p^*(n) = \alpha_2^*(\beta)$ и пластового давления

$$P_{ni}^*(n) = P(t_0) + \frac{1}{4\pi\sigma_n^*} \int_{t_0}^n \frac{(q_0 - q(\tau))}{n - \tau} \exp\left(-\frac{1}{k_p^*(n - \tau)}\right) \cdot d\tau$$

получены с использованием стратегии «скользящего интервала», где в обработке участвуют данные из интервала $[n_n + \Delta n + i]$, $1 \leq i \leq n_k - \Delta n$, $n_n = 0$, $\Delta n = 5$, что достигается соответствующим выбором значений весовых функций $w(n)$, $n = \overline{1, n_k}$ в матрице W (7), (9), (10). Здесь i – номер текущего интервала обработки; n_n , Δn – количество измерений забойного давления в начальном участке КВД $[t_0, t_n]$ и, соответственно, в интервале обработки. Оценки управляющих параметров $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ получены путем решения оптимизационной задачи

$$\beta_n^* = \arg \min_{\beta} \|P_{3,n}^* - P_3(t_n, \alpha_n^*(\beta), q)\|^2$$

методом деформированного многогранника [5].

В качестве дополнительных априорных сведений использовались данные о гидропроводности $\bar{\sigma} = 1$ Дсм/сП, комплексном параметре $k_p = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, пластовом давлении $P_{ni} = 245$ ат, и накопленной жидкости в стволе скважины после ее остановки $\bar{V} = 2$ м³ с последующей их корректировкой по схеме приведенной в [6].

Таблица. Результаты обработки КВД скважины № 335

Метод	Время, ч	Пластовое давление, ат	Гидропроводность, Дсм/сП	Комплексный параметр, с ⁻¹ ·10 ⁻⁴
«PanSystem»	98	243,6	0,252	0,47807
«Saphir»	98	242,8	0,246	0,48134
АМНС	25	260,1	0,223	0,40235
	50	257,9	0,245	0,74412
	75	256,6	0,247	1,08129
	98	254,6	0,268	2,31790
АМИМ_1	25	258,6	0,231	0,48573
	50	258,0	0,234	0,48409
	75	257,2	0,233	0,48340
АМИМ	98	256,1	0,232	0,48314
	25	246,9	0,252	0,48716
	50	245,4	0,251	0,48407
	75	244,6	0,253	0,48334
	98	243,6	0,250	0,48309

На рис. 1–3 и в таблице приведены оценки пластового давления, гидропроводности и комплексного параметра, полученные адаптивным методом интегрированных моделей в системе «пласт–скважина» (АМИМ), адаптивным методом интегрированных моделей с учетом информации о фильтрационных параметрах пласта (АМИМ_1) и адаптивным методом наилучшего совмещения (АМНС) за разные периоды исследований.

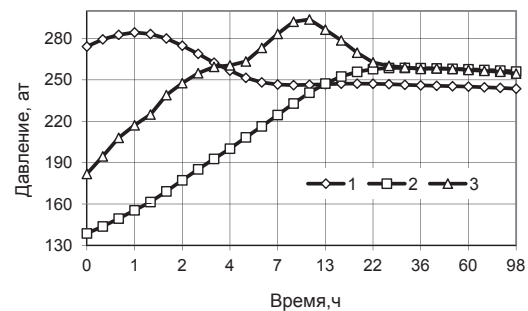


Рис. 2. Оценки пластового давления с учетом притока; Метод: 1) АМИМ; 2) АМИМ_1; 3) АМНС

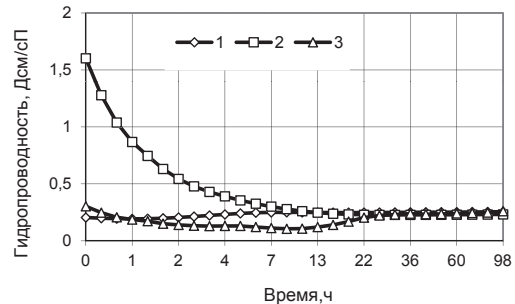


Рис. 3. Оценки гидропроводности пласта; Метод: 1) АМИМ; 2) АМИМ_1; 3) АМНС

Из рис. 2, 3 и таблицы видно, что оценки параметров нефтяного пласта, полученные адаптивным методом интегрированных моделей в системе «пласт–скважина», устойчивые и более точные по сравнению с оценками, полученными адаптивным методом наилучшего совмещения и адаптивным методом интегрированных моделей с учетом информации о фильтрационных параметрах пласта.

Выводы

1. Предложены модели и алгоритмы адаптивной идентификации и интерпретации нестационарных гидродинамических исследований скважин в системе «пласт–скважина», основанные на технологии метода интегрированных моделей и позволяющие наиболее полно учитывать дополнительную априорную информацию о фильтрационных параметрах, энергетическом состоянии нефтяных пластов и накопленной продукции в скважине после ее остановки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шагиев Р.Г. Исследование скважин по КВД. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
2. Ипатов А.И., Кременецкий М.И., Гуляев Д.Н. Современные технологии гидродинамических исследований скважин и их возрастающая роль в разработке углеводородов // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 1. – С. 52–55.
3. Сергеев В.Л., Аниканов А.С. Метод адаптивной идентификации гидродинамических исследований скважин с учетом априорной информации // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 50–52.

2. На примере гидродинамических исследований скважины нефтяного месторождения Тюменской области показано, что метод адаптивной интерпретации в системе «пласт–скважина» дает более устойчивые и точные оценки параметров однородно пористого нефтяного пласта, сокращает время простоя скважины по сравнению с традиционным методом наилучшего совмещения, технологиями, реализованными в программных комплексах «PanSystem» и Saphir, и технологией адаптивной идентификации, где учитывается априорная информация только о фильтрационных параметрах пласта.
3. Наиболее полный учет дополнительной априорной информации о фильтрационных параметрах и энергетическом состоянии пласта и скважины позволяет повысить качество алгоритмов интерпретации, сократить простой скважин и увеличить добычу нефти.

4. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 198 с.
5. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.
6. Кемерова П.А., Сергеев В.Л., Аниканов А.С. Адаптивная идентификация и интерпретация нестационарных гидродинамических исследований с учетом притока продукции в скважине // Известия Томского политехнического университета. – 2011 – Т. 319. – № 5. – С. 43–46.

Поступила 21.04.2012 г.

УДК 004.415

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УЧЕТА ОБЛАЧНОСТИ В ЗАДАЧЕ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ETM+/LANDSAT

Д.В. Соломатов¹, С.В. Афонин¹, В.В. Белов^{1,2}¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск²Томский государственный университет

E-mails: solomatov@iao.ru; afonin@iao.ru; belov@iao.ru

Рассматриваются вопросы атмосферной коррекции спутниковых измерений в видимой области спектра. Проведен анализ существующего программного обеспечения для атмосферной коррекции данных широко используемых спутниковых систем, их преимуществ и недостатков. Представлена архитектура программного комплекса для атмосферной коррекции спутниковых измерений. Рассматривается реализация алгоритмов получения облачной маски и удаления полупрозрачной облачности на примере снимка, полученного прибором ETM+ со спутника Landsat7.

Ключевые слова:

Алгоритмы, спутниковые данные, атмосферная коррекция, облачность, программное обеспечение.

Key words:

Algorithms, satellite data, atmospheric correction, cloudiness, software.

Данные спутникового зондирования земной поверхности, получаемые в спектральном диапазоне 0,4...2,1 мкм, имеют широкое применение для решения целого спектра научных и прикладных задач. В настоящее время широко используются спутниковые данные различного пространственного разрешения, такие как NOAA POES, EOS/MODIS, SPOT, EOS/Aster, Landsat и другие. Однако спутниковые измерения подвержены значительному влиянию различных искажающих факторов: поглощение излучения атмосферными газами, релеевское рассеяние, ослабление и рассеяние излучения аэрозолями и облачностью, процесс бокового подсвета (*adjacency effect*) с учетом рельефа местности. Для учета этих факторов осуществляется атмосферная коррекция (АК) спутниковых измерений. Задача атмосферной коррекции заключается в вычислении указанных искажающих факторов, исключении их из оптического сигнала, измеряемого на спутнике, и восстановлении спектральной отражательной способности земной поверхности ρ_i .

Для первичной и тематической обработки спутниковых данных разработано соответствующее программное обеспечение. Например, для атмосферной коррекции данных MODIS используется программа [1], разработанная в Direct Readout Laboratory (DRL) GSFC/NASA (Goddard Space Flight Center, NASA). Однако в этой программе учитывается только молекулярно-аэрозольное поглощение и рассеяние, а процесс бокового подсвета игнорируется. На сайте спутниковой системы SPOT пользователи могут получать данные, которые прошли только радиометрическую и геометрическую коррекцию, но без учета атмосферных искажающих факторов. Рекомендуемый для атмосферной коррекции данных SPOT метод SMAC (Simplified Method for the Atmospheric Correction) [2] также учитывает только молекулярное и аэрозольное рассеяние и поглощение.

В тоже время для достижения максимальной точности при атмосферной коррекции спутниковых данных должен быть применен подход, где принимается во внимание оптико-метеорологическое состояние атмосферы, геометрия наблюдений и рельеф поверхности [3, 4]. Например, для проведения коррекции спутниковых данных в случае плоской земной поверхности предполагается выполнение следующих этапов:

- создание облачной и водной масок;
- удаление солнечной дымки и полупрозрачной облачности;
- компенсация эффектов затенения;
- определение метеорологической дальности видимости или аэрозольной оптической толщины;
- восстановление содержания водяного пара в атмосфере;
- расчет таблиц оптических характеристик атмосферы (Look-Up-Table, LUT) с целью быстрого учета молекулярного и аэрозольного поглощения и рассеяния при проведении АК;
- вычисление функции размытия точки (ФРТ) и учет процесса бокового подсвета;
- восстановление отражательной способности земной поверхности.

В случае рельефной поверхности алгоритм атмосферной коррекции содержит те же этапы, но на каждом из них добавляется учет данных из цифровой модели рельефа.

Существуют коммерческие программные средства атмосферной коррекции, такие как, ATCOR, ACORN, FLAASH, использующие в своей основе программы решения задач переноса излучения (напр., MODTRAN или 6S), которые позволяют учитывать большинство искажающих факторов. Однако перечисленные программные средства являются платными и распространяются без исходных кодов, что не позволяет осуществлять их доработку и развитие с использованием новых теорети-

ческих и информационных разработок в области решения задачи атмосферной коррекции.

В этой связи возникает необходимость реализации программных средств атмосферной коррекции спутниковых измерений в видимой области спектра, которые были бы лишены указанных недостатков.

Учитывая, что общая схема обработки данных одинакова для разных спутниковых систем, целесообразно построение программного комплекса по модульному принципу. В этом случае блоки чтения данных и специфичные для разных спутниковых систем функции реализуются в отдельных модулях, а общие функции, основная логика работы ПК и общая часть графического интерфейса – в главном приложении. Благодаря такому подходу программный комплекс становится расширяемым, появляется возможность добавления новых алгоритмов обработки и поддержки новых форматов данных. Архитектура такого программного комплекса приведена на рис. 1.

Представленный программный комплекс построен по модульному принципу с использованием абстрактных интерфейсов для взаимодействия между его компонентами. Благодаря этому блоки чтения и обработки данных не зависят друг от друга и от управляющего приложения. Такой подход позволяет добавлять в программный комплекс новые блоки для поддержки других спутниковых систем или новые реализации алгоритмов коррекции без изменений остальных частей программного комплекса.

В процессе атмосферной коррекции на первом этапе «Входные данные» (калиброванные спутниковые измерения) с помощью «Блока чтения данных» преобразуются в универсальный формат для последующей коррекции. При таком подходе вся

информация о структуре и процедуры конвертации форматов файлов разных спутниковых систем локализуются в «Блоках чтения данных», а остальные части программного комплекса не зависят от формата входной информации.

Непосредственное использование модели переноса излучения для атмосферной коррекции каждого пикселя – это трудоемкая процедура, которая не может быть использована в оперативном режиме. Для увеличения скорости в данной архитектуре атмосферная коррекция производится по заранее рассчитанным таблицам LUT. Для этих целей используется входящая в состав программного комплекса программа расчета LUT, которая производит необходимые вычисления по заданным спектральным характеристикам канала с помощью модели переноса излучения.

На основе блоков получения информации об оптико-метеорологическом состоянии атмосферы определяются необходимые атмосферные параметры (облачная маска, характеристики аэрозоля и облачности). В связи с тем, что для разных спутниковых систем применяются различные алгоритмы восстановления атмосферных характеристик, в архитектуре программного комплекса предусмотрена возможность использования нескольких блоков получения информации об оптико-метеорологическом состоянии атмосферы, каждый из которых обеспечивает поддержку конкретного спутникового прибора.

На заключительном этапе в блоках атмосферной коррекции производится учет искажающего влияния атмосферы с использованием информации об её оптико-метеорологическом состоянии на основе таблиц характеристик АК. Благодаря независимости этих блоков от форматов входных данных и способа получения информации об оп-

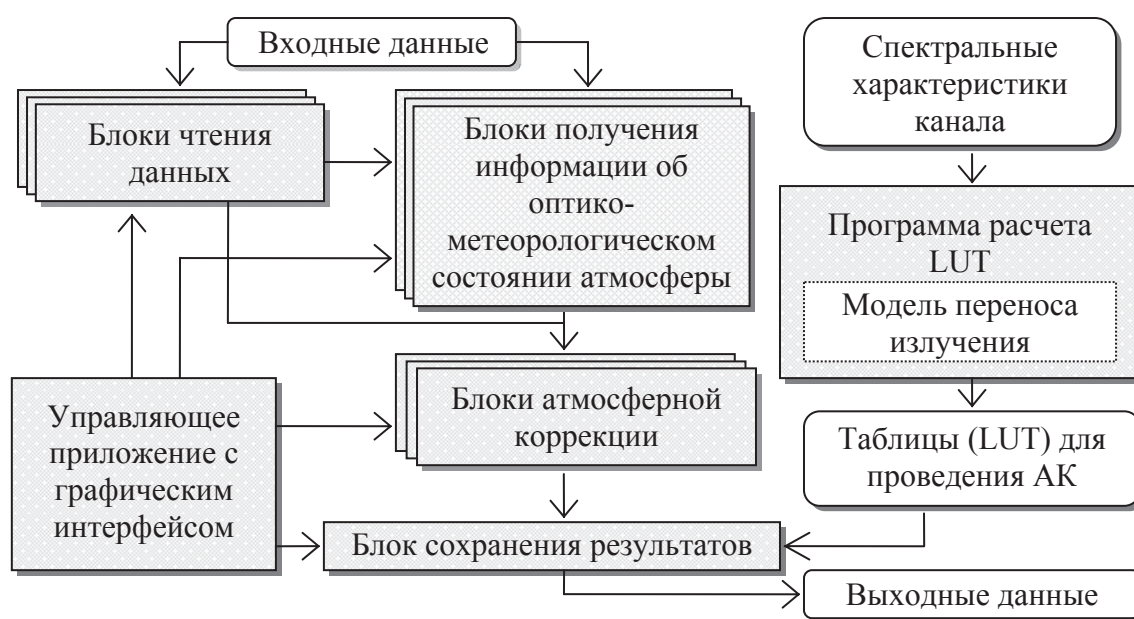


Рис. 1. Архитектура программного комплекса

тико-метеорологическом состоянии атмосферы становится возможным унифицированный подход к атмосферной коррекции данных разных спутниковых систем.

Наличие на спутниковом снимке плотной и полупрозрачной облачности может значительно повлиять на значения, измеренные в видимых каналах прибора. Так, плотная облачность практически не оставляет возможности получить измерения характеристик поверхности, а полупрозрачная облачность может значительно исказить сигнал.

В этой связи первым и одним из самых важных этапов атмосферной коррекции является обнаружение на снимке облачности. Этот процесс разбит на 2 стадии. На первой стадии производится поиск на снимке плотной облачности и строится облачная маска. Облачная маска используется для исключения облачных пикселей из дальнейшей обработки. На второй стадии производится поиск полупрозрачной облачности, для которой спутниковые измерения ρ_λ могут быть скорректированы с помощью специального алгоритма.

В данной работе рассматривается реализация алгоритмов построения облачной маски и удаления полупрозрачной облачности в рамках создаваемого программного комплекса и результаты их применения на примере спутникового снимка, полученного прибором ETM+ со спутника Landsat 7 для территории с центром 55,92 с.ш., 78,2 в.д.

С целью получения облачной маски был использован алгоритм ACCA (Automated Cloud Cover Assessment) [5].

Алгоритм состоит из 2 этапов. Первый этап представляет собой набор пороговых тестов в разных спектральных диапазонах (рис. 2). В результате на выходе алгоритма каждому пикселю снимка присваивается одно из четырех состояний: «снег», «облачный», «безоблачный», «неопределенный».

На втором этапе проводится статистический анализ по данным температурного канала 6, расположенного в спектральном диапазоне (10...13 мкм). Для холодной облачности рассчитываются минимум, максимум, среднее, СКО и коэффициент асимметрии по значениям температур в канале 6. Для всех пикселей, признанных на первом этапе облачными, строится гистограмма распределения температур. Температура, соответствующая значению 97,5 % в гистограмме, считается пороговой. Если коэффициент асимметрии положительный, то это значение увеличивается на величину сдвига. Сдвиг вычисляется умножением коэффициента асимметрии на СКО. Далее все пиксели, которые на первом этапе остались «неопределенными», проходят повторную проверку. Если температура ниже порогового значения, пиксель признается облачным, иначе – безоблачным.

Результаты работы программы для участка спутникового снимка ETM+ с наличием плотной

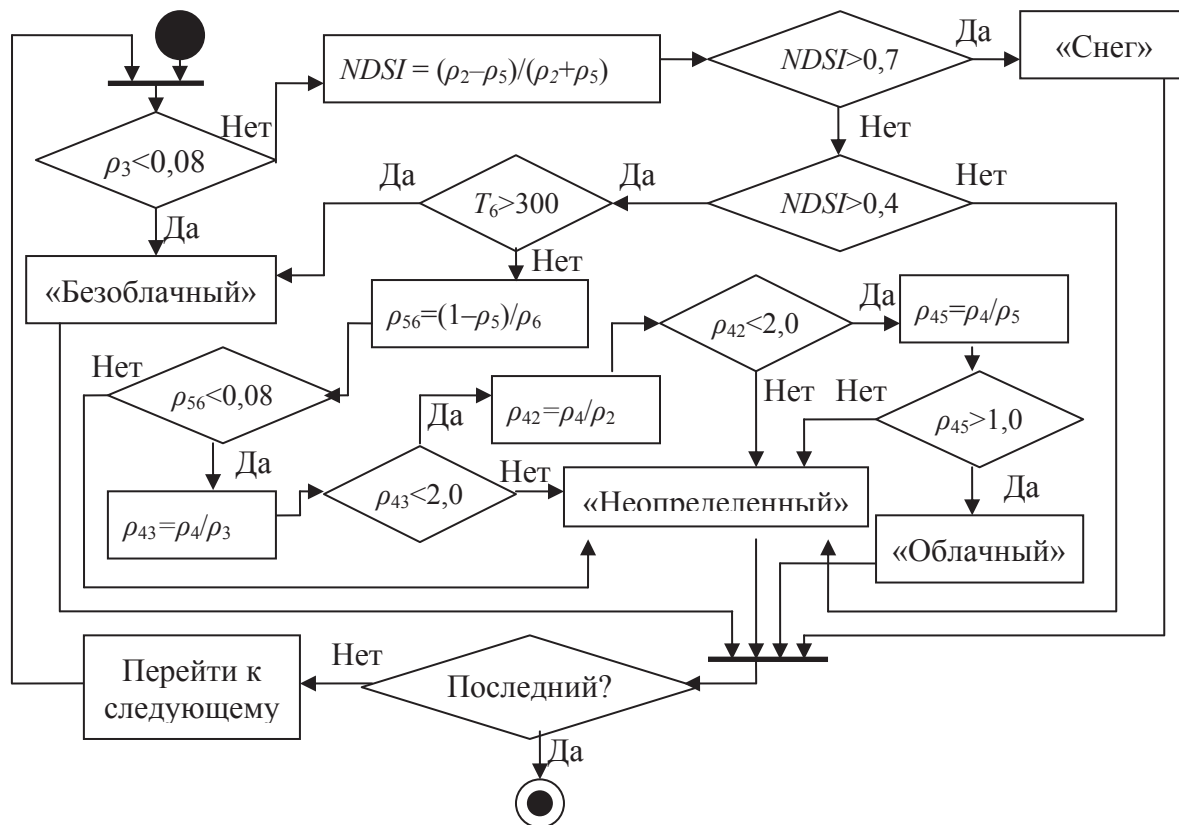


Рис. 2. Алгоритм получения облачной маски (этап 1)

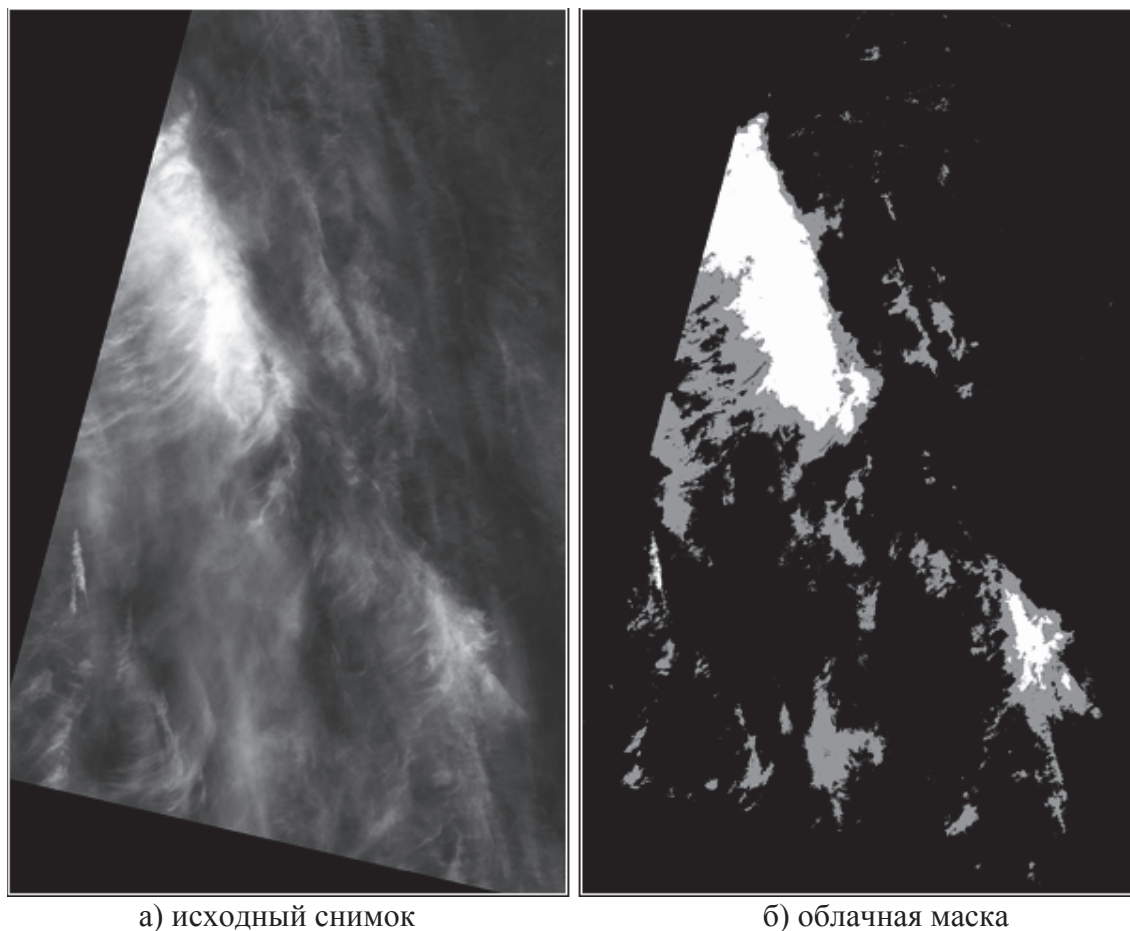


Рис. 3. Облачная маска

облачности представлены на рис. 3. На рис. 3, а, – участок снимка в первом канале прибора (0,450...0,515 мкм), на рис. 3, б, – полученная для этого участка облачная маска. Белым цветом изображена более плотная облачность, серым – менее плотная. Как можно видеть, контуры полученной облачной маски соответствуют визуально наблюдаемым в первом канале контурам облачности.

Полученная облачная маска используется на последующих этапах атмосферной коррекции, и пиксели, которые отмечены как «облачный» или «снег», не участвуют в дальнейших расчетах.

Кроме плотной облачности во многих случаях на спутниковых снимках присутствует солнечная дымка и полупрозрачная облачность. И если пиксели, содержащие плотную облачность, просто отсеиваются, то полупрозрачная облачность и дымка могут интерпретироваться как добавочный искажающий компонент в сигнал, измеренный прибором. Этот компонент должен быть оценен и исключен из общего сигнала.

Алгоритм учета солнечной дымки и полупрозрачной облачности [6] представлен на рис. 4.

Здесь DN_i^B , DN_i^R , x_1 и x_2 – некалиброванные измерения в канале синего спектрального диапазона (0,450...0,515 мкм), красного спектрального диапазона (0,630...0,690 мкм) и весовые коэффициенты каналов, соответственно. В основе алгоритма лежат преобразование ТС (Tasseled Cap) [7] и HOT (Haze Optimized Transform) [8].

Алгоритм состоит из 5 основных этапов:

1. Определение чистых и замутненных облачностью областей с помощью преобразования ТС. Чистыми считаются пиксели, для которых значение TC_i меньше среднего значения (TC^m).
2. Вычисление линейной регрессии между значениями в синем и красном каналах для чистых пикселей, вычисление угла наклона α линии регрессии.
3. Замутненные участки ортогональны линии регрессии, таким образом, может быть применено преобразование HOT.
4. Вычисление гистограммы HOT для замутненных областей.
5. Для замутненных пикселей ($HOT_i > HOT^m$) вычисляется поправка Δ_i к сигналу и осуществляется его коррекция: $DN_i(\text{new}) = DN_i - \Delta_i$.

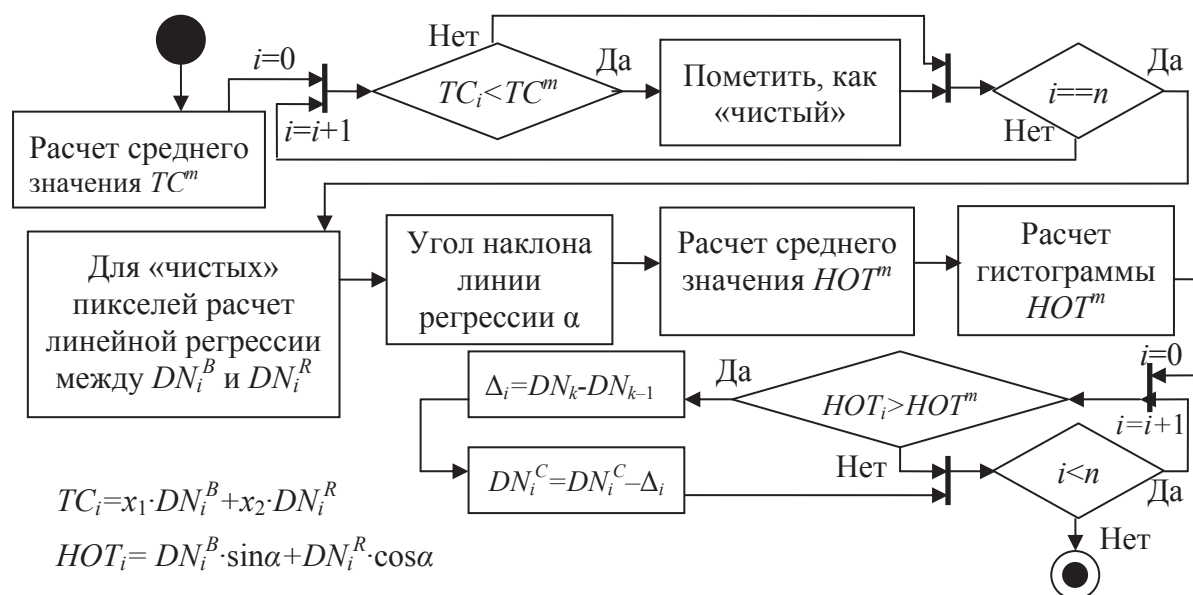


Рис. 4. Алгоритм удаления облачной дымки

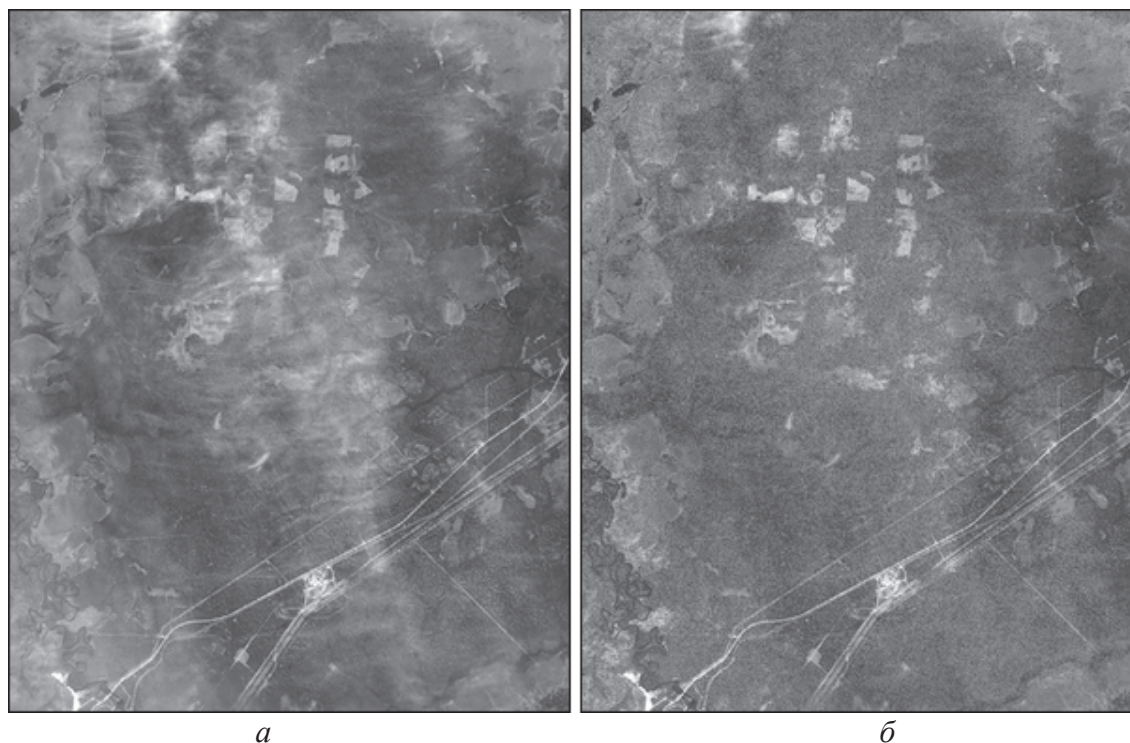


Рис. 5. Удаление полупрозрачной облачности а) исходный снимок; б) результаты работы алгоритма

На рис. 5 приведен пример работы алгоритма учета полупрозрачной облачности для участка спутникового снимка ЕТМ+. Как можно видеть, на исходном снимке (рис. 5, а), главным образом в центральной части, присутствует некоторое количество полупрозрачной облачности, которая закрывает собой поверхность Земли. В результате работы алгоритма (рис. 5, б) большая часть облачности (кроме самой плотной вверху) с изображения исчезла, и стала видна находя-

щаяся под ней структура земной поверхности. После удаления облачности снимок становится пригодным для дальнейших этапов атмосферной коррекции.

Таким образом, в рамках задачи реализации программного комплекса атмосферной коррекции успешно реализованы и апробированы на данных спутниковой системы ЕТМ+/Landsat алгоритмы получения облачной маски и удаления полупрозрачной облачности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vermote E.F., Vermeulen A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09) // Algorithm Theoretical Background Document, version 4.0. 1999. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf (дата обращения 10.09.2012).
2. Rahman H., Dedieu G. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum // Int. J. Remote Sensing. – 1994. – V. 15. – P. 123–143.
3. Richter R., Mueller A., Heiden U. Aspects of operational atmospheric correction of hyperspectral imagery // Int. J. Remote Sensing. – 2002. – V. 23. – P. 145–157.
4. Schlaepfer D., Richter R. Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. P. 1. Parametric orthorectification // Int. J. Remote Sensing. – 2002. – V. 23. – P. 2609–2630.
5. Irish R.R., Barker J.L., Goward S.N., Arvidson T. Characterization of the Landsat-7 ETM Automated Cloud-Cover Assessment (ACCA) // Algorithm. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2006. – V. 72. – № 10. – P. 1179–1188.
6. Richter R. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region // Computers and Geosciences. – 1996. – V. 22. – P. 675–681.
7. Crist E.P., Cicone R.C. A physically-based transform of Thematic Mapper data – the Tasseled Cap // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 1984 – V. GE-22. – P. 256–263.
8. Zhang Y., Guindon B., Cihlar J. An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images // Remote Sensing of Environment. – 2002. – V. 82. – P. 173–187.

Поступила 12.09.2012 г.

УДК 004.54

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ UNITESHK ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЬЮ ШИРОКОПОЛОСНОГО БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА СТАНДАРТА IEEE 802.16

И.В. Бойченко, Е.В. Бортников, А.А. Немеров

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: nemerov@asu.tusur.ru

Описана технология UniTESK и ее применение для функционального тестирования системы управления сетью широкополосного беспроводного доступа (СУ СШБД) стандарта IEEE 802.16 (WiMAX). Показано, что технология UniTESK достаточно проста и эффективна для тестирования событийно-управляемых систем. Рассматривается схема взаимодействия тестирующей и целевой системы.

Ключевые слова:

Коммуникационный протокол, широкополосный беспроводной доступ, система управления сетью, тестирование программного обеспечения, UniTESK, CTEsk, WiMAX, тестирование.

Key words:

Communication protocol, broadband wireless access, network management system, software testing, UniTESK, CTEsk, WiMAX, testing.

Введение

В настоящее время все большее распространение получают сети широкополосного беспроводного доступа. Это распространение вызвано появлением широкого спектра портативных устройств (ноутбуки, смартфоны), а широкополосные беспроводные сети, как известно, позволяют успешно решить проблему «последней мили». Также, беспроводная сеть может быть развернута в географически труднодоступных районах, где прокладка обычной кабельной сети сопряжена со значительными затратами или вообще невозможна.

В общем виде сети широкополосного беспроводного доступа состоят из следующих основных частей: базовых (БС) и абонентских станций (АС), а также оборудования, связывающего базовые станции между собой, с поставщиком сервисов и глобальной сетью Интернет. Для соединения базовой станции с абонентской, как правило, ис-

пользуется высокочастотный диапазон радиоволн.

Стандарт IEEE 802.16 описывает сеть широкополосного беспроводного доступа масштаба города (MAN – Metropolitan Area Network). Коммерческое название сетей, работающих по протоколу 802.16 – WiMAX.

Сеть WiMAX представляет собой совокупность беспроводного и базового (опорного) сегментов. Беспроводной сегмент определен стандартом IEEE 802.16 [1], базовый – определяется спецификациями WiMAX Forum (WMF). Базовый сегмент – это все, что не относится к радиосети, т. е. связь базовых станций друг с другом, связь с локальными и глобальными сетями (в том числе с Интернет). Базовый сегмент основывается на IP-протоколах и стандартах Ethernet (IEEE 802.3). Однако, собственно архитектура сети, включая механизмы криптозащиты, роуминга, хэндовера и т. п., описывается в документах WMF [2]. Стандарт IEEE 802.16 описывает физический и MAC-уровни сети.

Архитектура WiMAX-сети обеспечивает независимость архитектуры сети доступа, включая радиосеть, от функций и структуры транспортной IP-сети. Масштабируемость и гибкость WiMAX-сети возможна по таким эксплуатационным параметрам, как число абонентов, географическая протяженность зоны покрытия, частотные диапазоны, топология сети, мобильность абонентов [2].

Протоколы сетей широкополосного беспроводного доступа отличаются большей сложностью по сравнению с проводными сетями, такими как Ethernet, или беспроводными сетями с небольшой зоной покрытия, например, WiFi. В сети возможно большое число событий и состояний, предусмотренных протоколом. Это связано, во-первых, с нестабильностью беспроводных каналов, и, следовательно, необходимо выполнять мониторинг и подстройку. Во-вторых, протокол ориентирован на соединения с обеспечением качества обслуживания и основной контроль по управлению сетью должна брать на себя базовая станция. Все возможные события сети WiMAX описаны в стандарте IEEE 802.16 в виде сообщений.

В связи со сложностью протокола 802.16, усложняется также и тестирование реализации системы управления сетью на предмет соответствия протоколу, то есть проверка того, что на данное конкретное сообщение система управления сетью реагирует именно так, как того требует стандарт.

Суммарный объем документации стандарта IEEE вместе с рекомендациями WMF составляет несколько тысяч страниц. Как будет показано далее, технология UniTESK позволяет перевести технические спецификации стандарта на формальный язык автоматических тестов, не зависящих от конкретной программной или схемотехнической реализации.

Реализация системы управления сетью стандарта IEEE 802.16

Все управляющие воздействия, описанные в стандарте IEEE 802.16, передаются между программными модулями, в том числе между различными станциями, посредством управляющих MAC-сообщений.

Разрабатываемая кафедрой Автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) совместно с ЗАО «НПФ МИКРАН» реализация системы управления сетью стандарта IEEE 802.16 основана на событийно-ориентированной архитектуре. Событийно-ориентированная архитектура [3] является шаблоном архитектуры программного обеспечения, позволяющим создание, определение, потребление и реакцию на события. Модульная событийно-ориентированная архитектура хорошо подходит для реализации программного обеспечения базовой и абонентской станции. Такая архитектура соответствует идеологии стандарта IEEE 802.16. В такой архитектуре реализуется абстракция детерминирован-

ных автоматов. В данной реализации системы каждое управляющее MAC-сообщение стандарта передается с помощью определенного события.

Программное обеспечение базовой и абонентской станций декомпозируется на отдельные модули, например, модули управления сервисными потоками, модули поддержки мобильности и т. п. Обмен информацией между модулями осуществляется посредством событий: каждый модуль подписывается на те события, которые он должен обработать. Каждый модуль может генерировать в процессе работы события, которые должны быть обработаны другими модулями. Обработка события осуществляется в отдельном потоке операционной системы.

Реализация протокола IEEE 802.16 на основе событийно-ориентированной архитектуры легко поддается тестированию (модульному, функциональному, нагрузочному, стресс-тестированию) даже при отсутствии реальных радиоустройств. Любой модуль может быть заменен другим, выполняющим те же функции, но обладающим своими специфическими особенностями. Например, драйвер радиомодема может быть заменен на драйвер, ориентированный на работу с виртуальными сетевыми устройствами. Все события, которые могут возникнуть в сети, могут генерироваться в случайной или заданной последовательности внешними генераторами, что позволяет провести нагрузочное, функциональное и другие виды тестирования системы в условиях, приближенных к реальным, без применения радиооборудования.

Архитектура тестирующей системы

Тестируемую систему можно условно разделить на две части: ядро системы и подключаемые модули. Ядро системы организует всю работу системы, отвечает за размещение и функционирование модулей, связь между ними, и предоставляет прикладной интерфейс (API) для управления жизненным циклом модулей. Модули, как правило, создают сторонние разработчики, не имеющие доступа к исходному коду ядра системы.

В качестве тестируемой системы представлена реализация протокола IEEE 802.16 (WiMAX) [1]. Исходный код ядра системы и ряда модулей, недоступен, так как разрабатывается отдельной рабочей группой. Каждый модуль собирается в виде динамической библиотеки. Модули взаимодействуют посредством обмена сообщениями.

Для проведения автоматизированного тестирования на основе спецификаций был применен инструмент STESK [4]. Интеграция тестируемой системы с инструментом STESK была выполнена согласно схеме (рис. 1).

На рис. 1 представлены отдельные модули тестируемой и тестирующей системы. Связь между тестируемой и тестирующей системой организована через сокеты. К тестируемой системе добавлено два вспомогательных модуля: сервис-приемник и сервис-отправитель. Их цель — обеспечить ин-

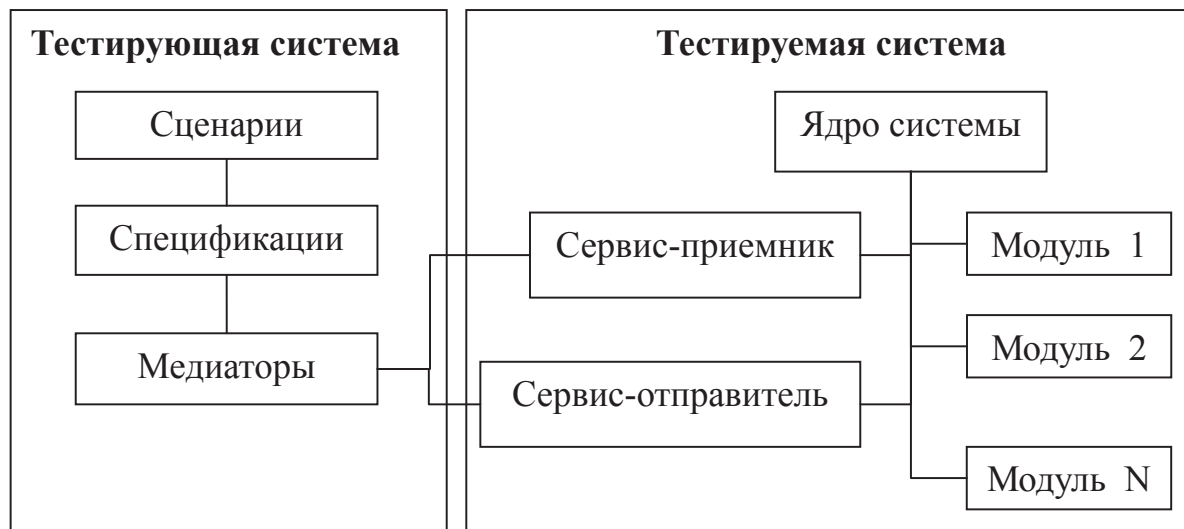


Рис. 1. Структурная схема тестирования взаимодействия

терфейс между тестируемой и тестирующей системой. Сервис-приемник прослушивает сетевой порт в ожидании сообщения от тестирующей системы и транслирует это сообщение в термины тестируемой системы. У сервиса-отправителя обратная функция: он переводит сообщение в термины тестирующей системы и записывает его в сокет. Во избежание взаимных блокировок для принятия и отправки сообщений используются разные сокеты. Также, взаимодействие через сокеты может быть полезным на следующих стадиях разработки, когда тестируемая система будет развернута на целевой аппаратной платформе. Сервис-приемник и сервис-отправитель разрабатываются как про-

граммные компоненты в течение всего цикла разработки системы.

Предложенный способ коммуникации тестируемой и тестирующей системы может быть применен не только в данной разработке, но и для тестирования других систем, ориентированных на обработку сообщений и имеющих собственный поток управления.

Сложность тестирования представленной системы в том, что она: 1) имеет собственные потоки управления; 2) может отвечать на тестовые воздействия асинхронно. Для тестирования таких систем в СТЕСК имеется механизм отложенных реакций [5]. Тестирующая система после отправки некото-

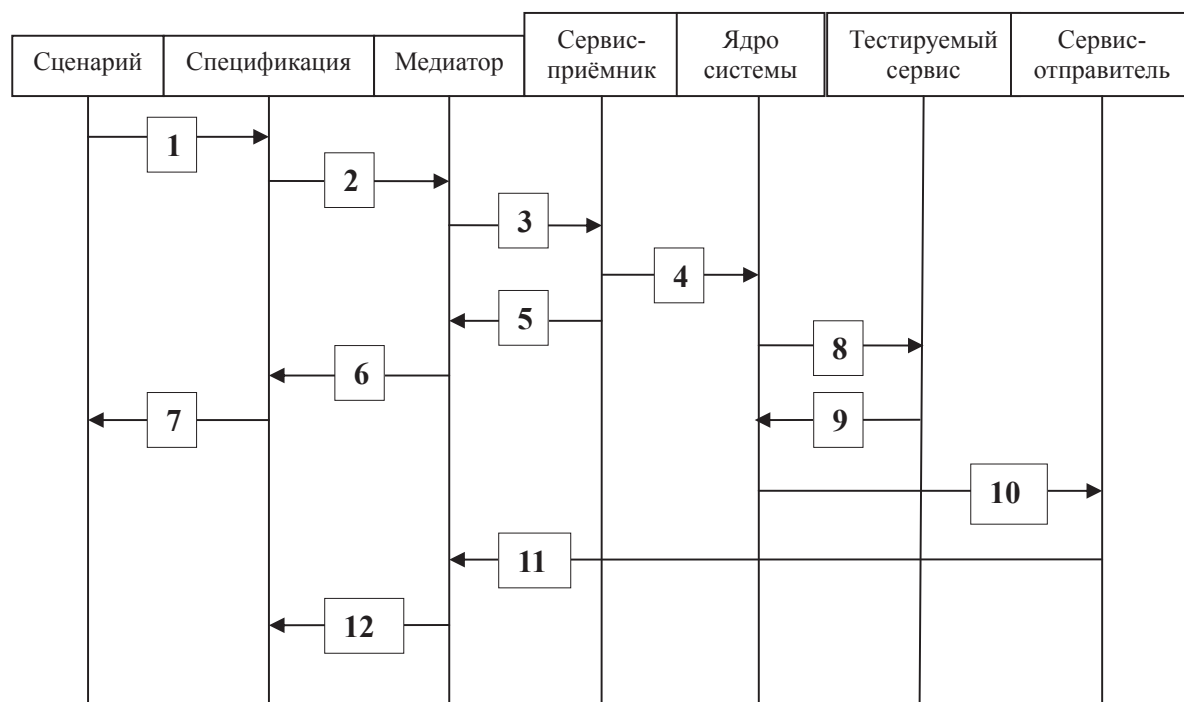


Рис. 2. Диаграмма последовательности тестирования

рых тестовых импульсов, ожидает некоторое время возникновения реакций на эти импульсы, затем обрабатывает реакции в соответствующих функциях, определяя, была ли корректна работа тестируемой системы. В этом случае уже не тестирующая, а тестируемая система является инициатором взаимодействия.

Ниже представлена диаграмма последовательности процесса тестирования системы. Опишем более подробно взаимодействия, представленные на диаграмме (рис. 2).

1. Сценарная функция вызывает спецификационную функцию;
2. Спецификационная функция вызывает медиаторную функцию;
3. Медиаторная функция посылает в сокет информацию о тестовом импульсе и необходимые данные;
4. Тестовый сервис-приемник формирует запрос к тестируемому сервису и отправляет его;
5. Тестовый сервис посылает медиатору уведомление, что запрос направлен;
6. Возврат из медиаторной функции;
7. Возврат из спецификационной функции;
8. Посылка сообщения тестируемому сервису;
9. Ответ тестируемого модуля;
10. Возврат результата запроса тестовому сервису отправителю;
11. Тестовый сервис-отправитель посылает результат перехватчику отложенных реакций в медиаторе.
12. Перехватчик реакций вызывает функцию-обработчик отложенных реакций.

Сообщения 1–7 – это посылка импульса в тестируемую систему, инициатором является тестирующая система. Сообщения 10–12 – это реакции тестируемой системы, которые фиксируются и обрабатываются тестирующей системой, инициатор – тестирующая система. Сообщения 8–9 – обработка тестовых импульсов внутри тестируемой системы.

Как видно из описания, спецификации теста являются абстрактными и могут использоваться для тестирования не только данной системы, но и целого класса систем, например различных реализаций сетевого протокола.

Тестирование ранжирования при входе АС в сеть

Рассмотрим тестирование начального ранжирования. В данном случае тестирующая система имитирует работу абонентской станции.

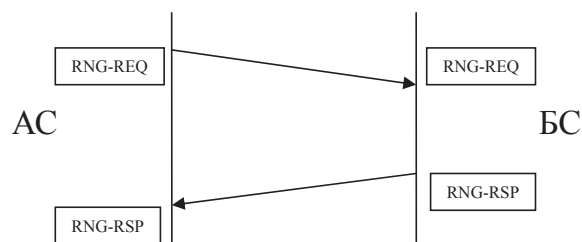


Рис. 3. Диаграмма взаимодействия станций при ранжировании

На этапе ранжирования АС посылает базовой станции (БС) сообщение RNG_REQ [1], по специально выделенному для этого каналу. БС, получив запрос, должна сформировать ответ – RNG_RSP. В ответе содержится информация о физических характеристиках (мощность АС, временное смещение в канале), MAC-адрес АС и другие поля, среди которых идентификатор основного соединения и идентификатор первичного соединения [2]. Одна из задач тестируемой системы на данном этапе – создать основной и первичный сервисные потоки и отправить абонентской станции ответное сообщение RNG_RSP.

Тестирование ранжирования АС выполняется в два этапа:

1. Тестирование взаимодействия (соответствие системы протоколу IEEE 802.16), которое проверяет следующие условия:
 - 1.1. на каждое посланное сообщение RNG-REQ должно приходиться ответное сообщение RNG-RSP;
 - 1.2. идентификаторы основного и первичного соединения должны присутствовать в сообщении RNG-RSP и иметь уникальные значения;
 - 1.3. значение идентификатора основного соединения должно находиться в интервале $1...N$, где N – максимально поддерживаемое число абонентских станций;
 - 1.4. значение идентификатора первичного соединения должно находиться в интервале $N+1...2N$, где N – максимально поддерживаемое число абонентских станций;
2. Модульное тестирование с просмотром внутренних состояний тестируемой системы:
 - 2.1. в хранилище сервисных потоков на базовой станции должны добавиться два новых потока.

Тестируемые требования были оформлены в виде спецификационных функций и отложенных реакций. Тестирующая система, имитируя, абонентскую станцию, посылает тестируемой системе запрос, на который через некоторое время обратно посылается ответ. Ответ перехватывается и обрабатывается в функции обработки отложенной реакции. Корректность этого ответа проверяется тестирующей системой. Ниже представлен код функции обработки отложенной реакции:

```

reaction RNG_RSP* rngRSP_spec (void)
    updates waitingList, activeFlowsCount
{
    post {
        if (! rngRSP_spec) return true;
        bool testLogic = value_Integer
            (rngRSP_spec->basicCID) != 0 &&
            value_Integer (rngRSP_spec->primaryCID) != 0 &&
            value_Integer (rngRSP_spec->basicCID) >= minBasicCID &&
            value_Integer (rngRSP_spec->basicCID) <= maxBasicCID &&
    
```

All Tests Completed Successfully

[-] Scenarios (1)

RNG_scenario

[-] Coverages

Frame Coverage

Series Coverage

—

[-] Branch Coverages

rngREQ_spec

—

rngRSP_spec

scenario RNG_scenario

execution

trace: /home/nemiroff/EtherNext/branches/testing/ctesk/RNG/RNG_scenario__2012-02-28_13-52-02.utt

start: Tue Feb 28 12:52:02 NOVT 2012

end: Tue Feb 28 12:52:05 NOVT 2012

Product Name: CTESK

Product Build: 20101221

Host: tiger

Product Version: 2.8.313

Operating System: Linux 3.0.0-16-generic

scenarios	states/trans
RNG_scenario	12/12

start states	transitions	end states	hits
• start	initialize()	0	1
0	rngREQ_scen()	2	1
10	rngREQ_scen()	12	1
12	rngREQ_scen()	14	1
14	rngREQ_scen()	16	1
16	rngREQ_scen()	18	1
18	rngREQ_scen()	20	1
2	rngREQ_scen()	4	1
20	rngREQ_scen() • start		1
4	rngREQ_scen()	6	1
6	rngREQ_scen()	8	1
8	rngREQ_scen()	10	1

Рис. 4. Успешное прохождение теста

```

value_Integer (rngRSP_spec->primaryCID) >= minPrimaryCID &&
value_Integer (rngRSP_spec->primaryCID) <= maxPrimaryCID &&

value_Integer (activeFlowsCount)==
value_Integer (@activeFlowsCount)+2;
if (testLogic) {
printf («Success\n»);
} else {
printf («Failure\n»);
}
return testLogic;
}
}

```

В списке *waitingList* содержатся отправленные запросы ранжирования. По мере прихода ответов запросы из списка удаляются. *activeFlowsCount* — количество активных потоков в хранилище. Модификатор *updates* означает, что эти переменные должны измениться. В обработчике реакции, как и в спецификационной функции, можно получить значение такой переменной как до, так и после тестового воздействия на систему.

При тестировании протокола без доступа к реализации, проверяя только получаемые сообщения, нельзя узнать реальное количество активных потоков. Можно лишь создать модель хранилища на стороне тестирующей системы и изменять ее в зависимости от тестовых взаимодействий. При проходе сценариев прямо или косвенно могут проявиться отклонения, связанные с неправильной работой реального хранилища. Информацией, откуда берется количество активных потоков, владеет слой медиаторов. Реализация на спецификации

не влияет.

Результаты выполнения тестов

После прохождения тестов тестирующая система формирует трассу их прохождения в формате XML. Трасса содержит все действия тестирующей системы и может быть представлена в формате простого текста или в формате HTML-страницы.

В текстовом формате UniTESK Reports помещает главную статистическую информацию о количестве пройденных тестов в начало файла. В качестве примера ниже представлена основная (статистическая) часть файла результата при выполнении тестов без ошибок.

Для восприятия человеком более удобен HTML-формат, в котором с помощью ссылок можно переходить к просмотру выполнения определенного сценария, спецификационной функции, сообщения об ошибке. Также, HTML-представление отображает информацию в виде удобных для восприятия таблиц, рис. 4.

Чтобы убедиться в работе тестирующей системы в тестируемую были намеренно введены дефекты. Одним из таких дефектов была ошибка генерации значения первичного идентификатора потока. Идентификатор потока мог быть создан за рамками допустимого диапазона. Тестирующая система успешно справилась с задачей и, как только значение вышло за рамки диапазона, она просигнализировала об ошибке, рис. 5.

В случае неуспешного теста разработчика будет интересовать конкретное состояние системы и воздействие, вызвавшее ошибку. Эту информацию можно увидеть в развернутом описании ошибки (рис. 6).

scenario RNG_scenario

execution

trace: /home/nemiroff/EtherNext/branches/testing/ctesk/RNG/RNG_scenario__2012-02-28_14-16-32.utt
 start: Tue Feb 28 13:16:32 NOV 2012
 end: Tue Feb 28 13:16:32 NOV 2012
 Product Name: CTESK
 Product Build: 20101221
 Host: tiger
 Product Version: 2.8.313
 Operating System: Linux 3.0.0-16-generic

scenarios	states/trans/fails
RNG_scenario	9/8/1

start states	transitions	end states	failures	hits/fails
• start	initialize()	0		1
0	rngREQ_sцен()	2		1
10	rngREQ_sцен()	12	failure 1: Serialization Failed	1/1
12	finalize()	◇ end		1
2	rngREQ_sцен()	4		1
4	rngREQ_sцен()	6		1
6	rngREQ_sцен()	8		1
8	rngREQ_sцен()	10		1

Рис. 5. Результаты прохода теста с ошибкой: трасса

Interim failure 1:

Postcondition Failed

location

trace /home/nemiroff/EtherNext/branches/testing/ctesk/RNG/RNG_scenario__2012-02-28_14-16-32.utt, line 326

occurrence

scenario RNG_scenario
 transition rngREQ_sцен()
 specification function rngRSP_spec()

return value (RNG_RSP *)

```

struct _RNG_RSP
{
    basicCID = 11
    primaryCID = 21
}
    
```

prime formula invariant var @waitingList = true
 prime formula invariant var waitingList = true
 prime formula invariant type Set *(@uniqueCIDs) = true
 prime formula invariant type Set *(uniqueCIDs) = true
 prime formula invariant var @activeFlowsCount = true
 prime formula invariant var activeFlowsCount = true

properties

interim true
 kind POSTCONDITION_FAILED

Рис. 6. Результаты прохода теста с ошибкой: описание ошибки

Из файлов результатов можно получить подробности прохождения теста: переходы между состояниями, стек вызовов сценарных функций, значения переменных. Таким образом, можно регулярно проводить регрессионное функциональное тестирование реализации системы управления сетью стандарта IEEE 802.16.

Дальнейшая работа будет связана с наполнением базы тестов, а также с адаптацией технологии UniTESK для тестирования таких механизмов протокола IEEE 802.16 как качество обслуживания – QoS.

Выводы

В работе предложена технология тестирования реализации системы управления сетью стандарта IEEE 802.16. Оригинальность предложенной технологии заключается в применении технологии UniTESK для тестирования промышленной реализации системы.

В итоге, можно выделить следующие преимущества предлагаемого подхода:

- формальность и абстрактность спецификаций обеспечивает возможность применения набора тестов для тестирования некоторого класса систем, например, различных реализаций одного сетевого протокола;
- автоматическое выполнение тестов позволяет выполнять регрессионное тестирование сложных систем в ходе разработки;
- предложенный способ коммуникаций тестируемой и тестирующей системы позволяет выполнять тестирование как по типу вход-выход, так и с учетом внутренних состояний системы.

Разработка осуществляется в соответствии с госконтрактом № 13.G25.31.0011 от 07 сентября 2010 г.

Данная технология использована в НИР, выполняемой по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 14.740.11.0398; шифр заявки 2010-1.1-215-138-022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems // IEEE Std 802.16-2009 (Revision of IEEE Std 802.16-2004). PP. C1-2004, May 29, 2009. doi: 10.1109/IEEESTD.2009.5062485). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5062485&isnumber=5062484>, (дата обращения: 04.09.2012).
2. Вишнеvский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.
3. Taylor H., Yochem A., Phillips L., Martinez F. Event-Driven Architecture: How SOA Enables the Real-Time Enterprise. – Boston: Addison-Wesley, 2009. – 308 p.
4. UniTESK. URL: <http://unitesk.ru/> (дата обращения: 04.09.2012).
5. Groshov S.G. Применение технологии UniTesK для тестирования систем с различной конфигурацией активных потоков управления. // citforum.ru. 2012. URL: http://citforum.ru/SE/testing/unitest_use/ (дата обращения: 04.09.2012).
6. Nuaymi L. WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access. – New York: John Wiley & Sons, 2007. – 310 p.

Поступила 14.09.2012 г.

УДК 004.021

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ФРАКТАЛЬНОМУ СЖАТИЮ RGB-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КЛАСТЕРЕ

И.В. Бойченко, С.С. Кулбаев, А.А. Немеров, В.В. Голенков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: kulbaev@asu.tusur.ru

Описан эксперимент по сжатию полноцветных изображений на основе фракталов с применением высокопроизводительной вычислительной системы с распределенной памятью – вычислительном кластере. Межпроцессный обмен осуществляется на основе технологии MPI. Показана линейная зависимость времени вычислений от количества вычислительных процессов. Выявлена неравномерность нагрузки вычислительных процессов, вызванная неоднородностью сжимаемых изображений. Проведено сравнение качества и размера сжимаемых изображений на основе фракталов и на основе алгоритма JPEG.

Ключевые слова:

Параллельные вычисления, интерфейс передачи сообщений, фракталы, сжатие изображений, вычислительные процессы, высокопроизводительные вычислительные системы.

Key words:

Parallel computation, message passing interface, fractals, image compression, computational processes, high-performance computing systems.

Повышенный интерес к алгоритмам сжатия изображений на основе фракталов вызван необходимостью минимизации размеров передаваемых или хранимых данных. Для сжатия статических изображений существует множество методов [1–3]. Наиболее известными из методов сжатия графической информации с потерей качества являются алгоритмы JPEG и JPEG2000. Поэтому, при разработке новых алгоритмов, проводят сравнение именно с JPEG. При рассмотрении алгоритмов сжатия наиболее важными являются три основных свойства: коэффициент компрессии, степень потери качества по сравнению с оригиналом, трудоемкость. Однако в рамках различных задач ценность этих параметров не равнозначна. Для случая дефицита дискового пространства и полосы пропускания каналов, при достаточном количестве вычислительных мощностей, представляет интерес использование фрактального сжатия [2], обладающего потенциально более высоким коэффициентом компрессии, но более трудоемким при сжатии. Обратный процесс – распаковка, требует меньше вычислений, чем у JPEG [3]. Свойство, заключающееся в независимости восстанавливаемого изобра-

жения от разрешения, позволяет использовать фрактальный алгоритм для визуализации цифровых изображений на больших экранах.

Как правило, в работах, посвященных исследованию алгоритмов фрактального сжатия, накладывается такое ограничение, что алгоритм должен обеспечивать приемлемое время сжатия на персональном компьютере [4, 5]. Поскольку полный перебор при поиске соответствия доменных и ранговых блоков приводит к большому количеству операций, то усилия разработчиков, в основном, направлены на сокращение количества сравнений блоков за счет предварительной классификации [6]. Сокращение числа рассматриваемых блоков неизбежно приводит к большим потерям качества по сравнению с полным перебором. В данном исследовании ограничение на производительность вычислительной системы было ослаблено исходя из того, что высокопроизводительные системы разных классов становятся все более доступными для конечных пользователей. Так, сервисы типа GRID и «облачные вычисления» позволяют задействовать удаленные вычислительные мощности в режиме on-line. Другим трендом развития совре-

менных вычислительных систем являются акселераторы вычислений GPGPU, ярким представителем которых является технология CUDA, обеспечивающая терафлопную производительность за сравнительно низкую стоимость. Основной целью эксперимента являлась проверка масштабируемости алгоритма фрактального сжатия на системах с распределенной памятью. Системы с распределенной памятью позволяют объединять большое количество вычислителей — десятки и сотни тысяч ядер для передовых представителей класса.

В качестве исследуемого алгоритма был выбран базовый алгоритм фрактального сжатия изображений. Для поиска доменных блоков применялся метод полного перебора без предварительной классификации.

Базовый алгоритм фрактального сжатия

Понятие фрактал означает, что целое изображение состоит из уменьшенных копий его самого или его частей, то есть обладает свойством самоподобия. Увеличивая такое изображение, мы можем наблюдать одну и ту же степень детализации независимо от разрешения.

Алгоритм фрактального сжатия, предложенный Майклом Барнсли [7], основан на системе итерируемых функций (IFS — Iteration Function System). Но IFS не могут быть использованы как готовые системы сжатия реалистичных изображений. IFS необходима для понимания того, как работают фрактальные методы сжатия изображений. Арнауд Джеквин [8] впервые представил метод фрактального кодирования, основанный на IFS, в котором используются системы доменных и ранговых блоков реалистичных изображений.

Базовый алгоритм фрактального кодирования изображения описывается следующим образом:

1. Изображение $M \times N$ пикселей разбивается на множество R-блоков (ранговые блоки) R_1, R_2, \dots, R_r , где $R_i, i=1, \dots, r$ есть квадратный $B \times B$ пиксельный фрагмент изображения.
2. Изображение покрывается последовательностью D-блоков (доменные блоки) D_1, D_2, \dots, D_d , где D_i — представляющие квадратные (возможно пересекающиеся) $2B \times 2B$ пиксельные фрагменты. Домены могут быть разного размера, и их количество может исчисляться сотнями и тысячами.
3. Для каждого рангового блока находят домен и соответствующее преобразование, которое наилучшим образом покрывает ранговый блок. Обычно это аффинное преобразование.
4. Если достаточно точного соответствия не получилось, то разбиваем ранговые блоки на меньшие блоки. Данный процесс продолжается до тех пор, пока не получают приемлемого соответствия при заданной допустимой погрешности, или размер рангового блока достигает заданного минимального значения.

Организация вычислительных процессов фрактального сжатия

Одним из главных факторов увеличения времени сжатия является количество доменов. Каждый выбранный ранговый блок (с восьмью видами аффинного преобразования) необходимо сопоставить со всеми доменными блоками. Для уменьшения процесса перебора была предложена классификация доменных и ранговых блоков [9]. Так же процесс вычисления можно оптимизировать так, чтобы каждый ранговый блок обрабатывался по отдельности, то есть данные могут обрабатываться независимо, что позволяет распараллелить процесс вычисления [10].

В [6] представлен быстродействующий алгоритм фрактального сжатия изображений с глубиной цветности 8 бит. Ускорение достигается за счет уменьшения количества доменов.

В [11] представлена параллельная организация вычислительных процессов, основанная на многопоточной обработке, то есть в системах с общей памятью.

В данной статье предлагается параллельная реализация фрактального сжатия цветных изображений (глубина цветности 24 бит) с применением технологии MPI (Message Passing Interface — интерфейс передачи сообщений) [12]. В реализации использована модификация алгоритма из [2, 3] с перепорядочиванием блоков пикселей в памяти и разбиением методом квадродерева. Классификация доменных и ранговых блоков не использовалась, так как сокращение множества доменных блоков приводит к разбросу значения качества выходного (восстановленного) изображения.

Масштабирование параллельных вычислений с помощью MPI

В предлагаемой параллельной реализации алгоритма фрактального сжатия изображений вычислительные процессы (количеством N) организованы следующим образом:

- 1) главный процесс (с номером 0):
 - загружает и передает изображение в каждый рабочий процесс;
 - создает список задач (список ранговых блоков (R)) и распределяет задачи между рабочими процессами;
 - получает результат от очередного рабочего процесса и записывает в файл.
- 2) каждый рабочий процесс (с номерами от 1 до $N-1$):
 - получает изображение и создает список доменов для сравнения с ранговыми блоками;
 - получает список задач (список ранговых блоков) для поиска соответствий с доменными блоками;
 - производит вычисления (сопоставление доменных блоков с ранговыми блоками);
 - записывает параметры найденного соответствующего доменного блока в буфер, затем буфер передает *главному процессу*;

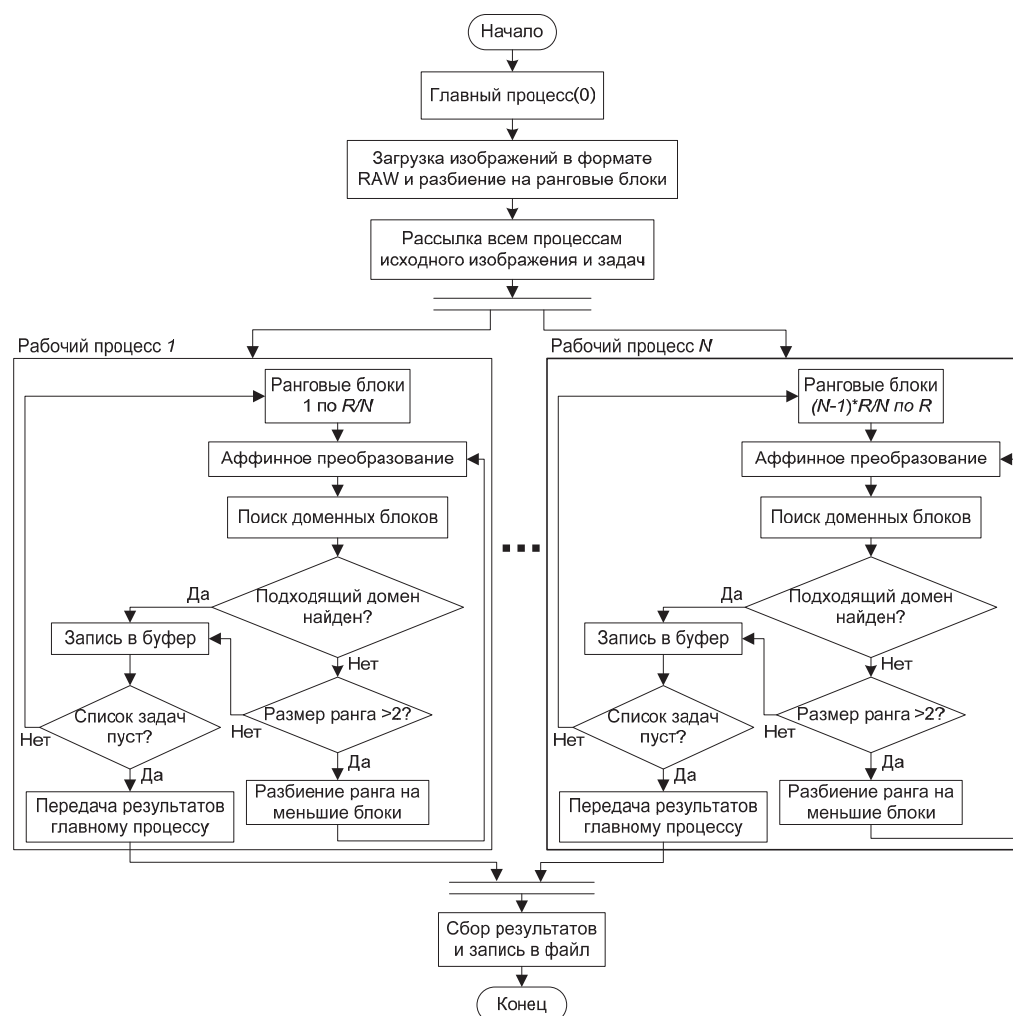


Рис. 1. Блок-схема параллельного алгоритма сжатия изображений на основе фракталов

- в случае отсутствия соответствующего доменного блока для выбранного ранга разбивает ранговый блок на меньшие блоки методом квадродерева и повторяет вычисления.

На рис. 1 приведена блок-схема параллельного алгоритма фрактального сжатия. Реализация алгоритма фрактального сжатия на нескольких вычислительных узлах и независимость ранговых блоков позволяют обеспечить хорошую масштабируемость задачи. В программной реализации для обмена сообщениями между главным процессом и рабочими процессами была применена технология MPI.

Создание списка доменных блоков в каждом рабочем процессе освобождает от необходимости обмена доменными блоками по сети, но повышает требуемый объем оперативной памяти. Каждое разбиение ранговых блоков на меньшие блоки назовем итерацией. Тогда, при количестве рабочих процессов, равном количеству рангов, сжатие одного блока займет от 1 до 4 итераций в случае ранга 16×16 пикселей, и от 1 до 3 итераций, в случае ранга 8×8 пикселей. Изображение разбивается на большее количество блоков на тех участках, где

имеется больше деталей для кодирования. Следовательно, время вычисления будет зависеть от структуры изображения и от времени обращения к памяти.

Контроль качества восстанавливаемого изображения

Качество восстанавливаемого изображения зависит от входных задаваемых параметров алгоритма фрактального сжатия. Параметром, сильно влияющим на качество, является пороговое значение, задающее разницу между обрабатываемым фрагментом и наилучшим его приближением.

Чем меньше допустимая погрешность, тем точнее осуществляется поиск доменного блока. С другой стороны, увеличивается количество операций, что влияет на общее время выполнения вычислений. Так же на качество восстанавливаемого изображения влияет шаг поиска доменов и размер ранговых блоков. Чем меньше шаг поиска, тем больше количество доменов и больше вероятность нахождения соответствующего доменного блока. Размер ранговых блоков влияет на размер выходного файла.

Чем меньше алгоритм дробит входное изображение на ранговые блоки, тем меньше количество хранимых структур доменных блоков, что уменьшает размер выходного файла. Для оценки качества восстанавливаемого изображения были использованы метрики SSIM и PSNR [13].

Результаты вычислительного эксперимента

Реализация алгоритма тестировалась на вычислительном кластере МСЦ РАН, предоставленном по программе «Университетский кластер» [14]. Установка состоит из 64-х вычислительных узлов, каждый из которых включает в себя 2 процессора Intel®Xeon®E5450 с тактовой частотой 3 ГГц, 8 Гб оперативной памяти и 100 Гб внешней памяти. Вычислительные узлы объединены сетью Infiniband. Кластер работает под управлением ОС Linux CentOS 5.4. Выполнение задач осуществляется через систему пакетной обработки TORQUE и планировщик ресурсов MAUI.

Исследуемый алгоритм был реализован на языке Си с применением библиотеки MPI версии 2.1.

Для тестов использовались цветные (RGB) изображения из базы данных группы фрактального

кодирования и анализа (fractal coding and analysis group) [15]. Используемые далее характеристики включают имя входного файла, количество используемых процессов (ядер), время сжатия, время декодирования (восстановления), размер сжатого файла, качество восстановленного по метрикам SSIM и PSNR.

В состав параметров фрактального алгоритма входят:

- размер рангового блока (начальный размер 8×8 пикселей);
- шаг поиска домена (4 пикселя);
- предел допустимой погрешности (0,005).

Предел допустимой погрешности определяет расстояние между средними значениями ранговых и доменных блоков. Если разница между средними значениями равна нулю, то сопоставляемый доменный блок идентичен ранговому блоку. Так как алгоритм не гарантирует нахождения идентичного доменного блока для всех ранговых блоков, то целесообразно задать некую допустимую погрешность при поиске. Для оценивания расстояния между блоками использована функция среднеквадратического отклонения [2, 9]:

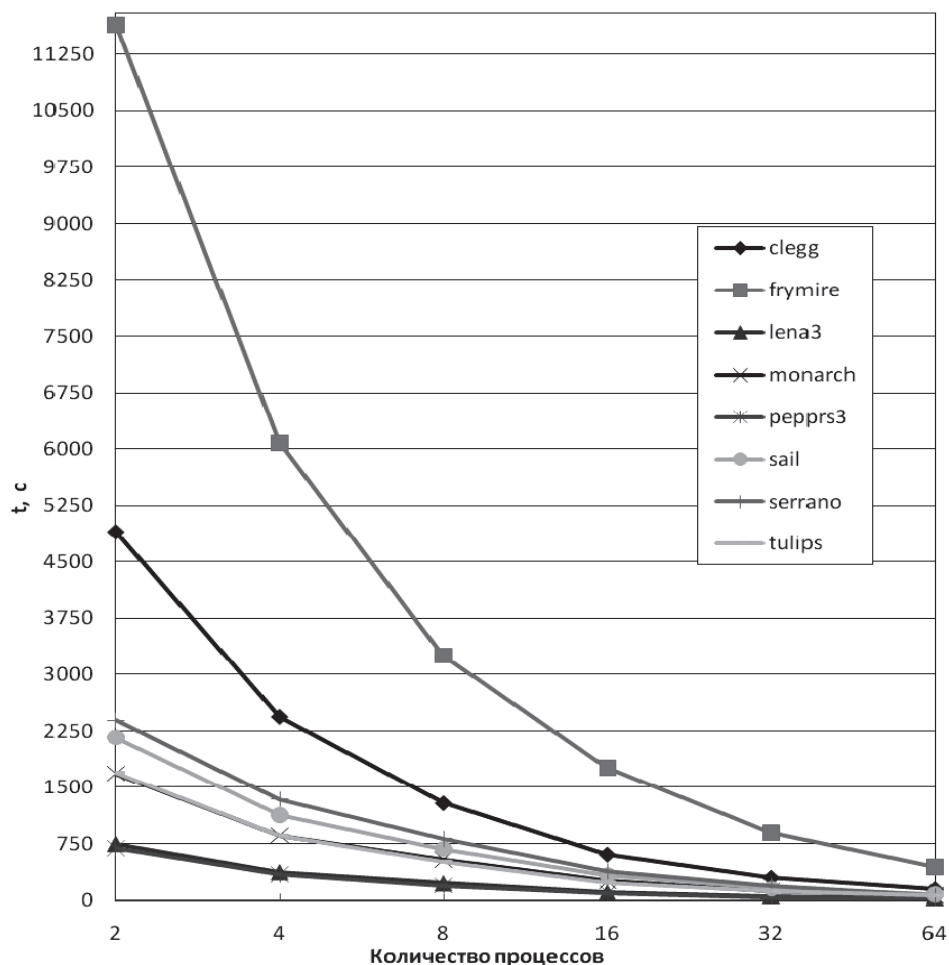


Рис. 2. Зависимость времени работы параллельного алгоритма от количества задействованных процессоров

Таблица. Результаты испытания MPI-реализации параллельного алгоритма фрактального сжатия

Изображение	Фрактальный алгоритм					Алгоритм JPEG			
	Время сжатия на 64-х ядрах, с	Время сжатия на 1 ядре, с	Время декодирования, с	Размер файла, кб	SSIM	PSNR, дБ	Размер файла, кб	SSIM	PSNR, дБ
clegg	155,529	4894,304	0,240	167,800	0,998	31,326	366,800	0,994	31,110
frymire	443,582	11642,376	0,250	584,100	0,989	30,690	601,900	0,997	33,390
lena3	28,484	743,089	0,051	79,300	0,987	38,243	74,600	0,985	39,753
monarch	66,466	1683,099	0,081	124,500	0,998	40,813	103,300	0,992	44,950
peppers3	24,361	686,439	0,054	68,400	0,989	39,753	72,700	0,944	42,076
sail	79,114	2164,089	0,104	197,100	0,994	38,620	163,000	0,991	42,090
serrano	64,239	2389,876	0,103	128,600	0,989	34,288	205,700	0,923	34,823
tulips	63,304	1697,637	0,087	117,100	0,991	39,083	129,400	0,985	42,100

$$\sigma = \sum_{i=1}^N (R_i^* - D_i^*)^2 / N,$$

где R_i^* – i -й преобразованный ранговый блок (аффинные преобразования); B_i^* – i -й преобразованный доменный блок ($D_i^* = sD_i + o$, где s – коэффициент изменения контраста; o – коэффициент сдвига по яркости); N – количество пикселей в ранговом блоке.

На рис. 2 в виде графика представлены результаты экспериментов. С увеличением количества рабочих процессов в два раза время (t) обработки фрактального алгоритма уменьшается приблизительно вдвое, что подтверждает линейность уменьшения времени сжатия фрактальным методом.

После распределения задач по процессам, каждый процесс выполняет поиск соответствия доменных и ранговых блоков в своей области изображения. В случае деления на меньшие ранговые блоки процессы также самостоятельно сопоставляют меньшие блоки с доменными блоками. Это означает, что в полученной области изображение может быть неоднородно, и для нахождения соответствия ранговый блок может дробиться до минимального размера (2×2 пикселя). В таких случаях возникает неравномерность нагрузки вычислительных процессов, так как, в зависимости от структуры изображения, количество разбиений (a , следовательно, и количество операций) при поиске блоков может отличаться для разных областей изображения.

Для примера можно взять изображение frymire. При сжатии изображение на 64 ядрах минимальное время обработки рабочим процессом составляет 129,037 с, а максимальное вычислительное время – 443,582 с.

Тем самым разброс по времени между рабочими процессами составляет 314,545 с. Среднее время продолжительности рабочих процессов составляет 350,251 с, и разница между максимальным и средним временем составляет 93,259 с. При равномерном распределении нагрузки время работы алгоритма уменьшилось бы на 26 %. Это направление требует дальнейших исследований в области методов балансировки нагрузки, например, таких, как указано в [16]. Решение вопросов балансировки вычислительной нагрузки значительно усложняется при изменении количества подзадач (разбиение

рангового блока методом квадродерева) в ходе вычислений. Перераспределение подзадач между процессорами уже непосредственно в процессе выполнения параллельной программы может приводить к задержкам (блокировкам, если запрашиваемые данные из очереди сообщений еще не были отправлены процессами-источниками).

В таблице дано сравнение по качеству восстановленного изображения и размеру сжатого файла для параллельной реализации алгоритма фрактального сжатия и для алгоритма JPEG. Сжатие фрактальным методом проводилось максимум на 64-х вычислительных ядрах с организацией 64-х параллельных MPI-процессов.

Как видно из таблицы, на 64-х ядрах можно получить, в среднем, 30-ти кратное ускорение сжатия. Также, следует отметить, что качество восстановленного изображения после фрактального сжатия несколько ниже по критерию PSNR, но выше по критерию SSIM, чем у изображения, сжатого методом JPEG. При этом в отличие от метода, представленного в работе [6], в данной реализации алгоритма не происходит скачков качества для разных изображений, и, в целом, это качество выше (на 20 %). Дисперсия качества восстановленных изображений алгоритма, представленного в работе [6], составляет 12,29 дБ, а в данной реализации алгоритма дисперсия составляет 3,69 дБ. Время сжатия на 64-х ядрах достаточно велико, но, как было указано выше, при увеличении количества вычислительных ядер можно существенно уменьшить время сжатия, так как алгоритм демонстрирует линейное ускорение. Объем сжатого файла меньше, чем у JPEG в среднем на 15 %, при этом следует учесть, что после фрактального сжатия не проводилось кодирование по Хаффману, тогда как в сравниваемой реализации JPEG [17] такое кодирование выходной последовательности проводится.

Выводы

Проведен эксперимент сжатия изображений фрактальным методом на высокопроизводительной вычислительной системе с распределенной памятью. На примере эталонных изображений из стандартной библиотеки показан выигрыш в объеме сжатого файла при сходном качестве по сравнению с алгоритмом JPEG. Подтверждена линейная

зависимость времени сжатия параллельным алгоритмом от числа процессоров (ядер). Выявлен дисбаланс нагрузки вычислительных процессов, вызванный неоднородностью сжимаемых изображений. В ходе дальнейших исследований предполагается рассмотреть методы выравнивания нагрузки вычислительных процессов, а также реализовать и исследовать алгоритм на вычислительных систе-

мах с большим количеством процессорных ядер, например, на системах, оснащенных акселераторами GPGPU.

Исследование поддержано грантом по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 14.740.11.0398) и проектом 7.701.2011 (НИР 1/12 темплана ТУСУР) по госзаданию Министерства образования и науки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
2. Уэлстид С.Т. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии. – М.: Триумф, 2003. – 320 с.
3. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 384 с.
4. Денисюк А.А., Полупанов А.А. Фрактальное сжатие изображений // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2006. – № 4. – С. 24–29.
5. Илюшин С.В. Ускорение фрактального сжатия изображений путем классификации блоков по полярному углу их центров МАСС // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – № 4. – С. 43–47.
6. Шарабайко М.П., Осокин А.Н. Быстродействующий алгоритм фрактального сжатия изображений // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 52–57.
7. Barnsley M.F. Fractals Everywhere. – London: Academic Press Inc., 1988. – 534 p.
8. Jacquin A.E. Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformations // IEEE Trans. on Image Proc. – 1992. – V. 1. – P. 18–30.
9. Fisher Y. Fractal image compression – Theory and Application. – N.Y.: Springer-Verlag, 1994. – 341 p.
10. Гергель В.П., Стронгин Р.Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем. 2 изд. – Н. Новгород: ННГУ, 2003. – 184 с.
11. Кулбаев С.С., Бойченко И.В., Голенков В.В. Эффективное сжатие цифровых изображений с применением высокопроизводительных вычислительных систем // VI Сибирская конференция по параллельному и высокопроизводительному вычислениям: Сб. трудов VI Сибирской конференции по параллельному и высокопроизводительному вычислениям. – Томск, 2012. – С. 75–80.
12. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI. – М.: МГУ, 2004. – 74 с.
13. Hore A., Ziou D. Image quality metrics: Psnr vs. ssim // International Conference on Pattern Recognition (ICPR). – Istanbul, Turkey, 2010. – P. 2366–2369.
14. Университетский кластер МЦП РАН // JSCC RAS Cluster Console. URL: <https://unihub.ru/resources/js3console> (дата обращения: 19.03.2012).
15. Test image repository // Fractal coding and analysis group. 2011. URL: <http://links.uwaterloo.ca/Repository.html> (дата обращения: 19.03.2012).
16. Rotaru T., Nageli H.H. Heterogeneous dynamic load balancing with a scheme based on the Laplasian polynomial // Lecture Notes in Computer Sciences. – 2001. – V. 1. – № 1. – P. 107–114.
17. ImageMagick // Convert, edit, and compose images. Studio LLC. 2011. URL: <http://imagemagick.org> (дата обращения: 15.12.2011).

Поступила 13.07.2012 г.

УДК 004.55

СИСТЕМА СЕМАНТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СОДЕРЖИМОГО ВЕБ-САЙТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ

П.И. Банокин, В.Н. Вичугов

Томский политехнический университет

E-mail: pavel805@gmail.com

Выявлена потребность в оптимизации содержимого веб-сайтов в соответствии с индивидуальными предпочтениями пользователей. Предложены способы оптимизации содержимого веб-страниц для различных сценариев использования приложения и способы хранения семантического профиля пользователя. Представлена реализация программной системы в виде набора JavaScript-компонентов и методика интеграции данной системы с существующими веб-приложениями.

Ключевые слова:

Семантическое веб-приложение, оптимизация содержимого веб-страниц, семантический профиль пользователя.

Key words:

Semantic web-application, web-page content optimization, semantic user profile.

Современные интернет-приложения содержат обновляющийся и разнообразный контент в неструктурированном виде. К таким сайтам относятся блоги, социальные сети, интернет-аукционы, фото- и видео-хостинги. В такой ситуации пользователям становится сложно ориентироваться в многообразии информации, представленной как на одной веб-странице, так и на целом веб-сайте.

Несмотря на популярность социальных сетей, поисковые системы являются основным источником новых посетителей для веб-сайтов. Существующие методы продвижения интернет-приложений в большей степени ориентированы на оптимизацию веб-страниц для поисковых систем. Довольно часто такие методы противоречат принципам удобства использования приложения. В результате создаются неестественные и сложные для понимания обычного пользователя заголовки страниц и названия ссылок, а качество интерфейса приложения и релевантность контента поисковому запросу снижаются.

В последнее время алгоритмы работы ведущих поисковых систем интернета изменились: поведение и предпочтения пользователя стали иметь большее значение при поисковом анализе веб-приложения [1]. Алгоритмы ранжирования веб-сайтов стали способны учитывать поведение пользователя на отдельной веб-странице [2]. Обычно выделяют следующие метрики для анализа поведения пользователей на веб-сайте: глубина просмотра, продолжительность визита, источник перехода, тип устройства, географическое положение пользователя. Поэтому возникла необходимость предоставления более качественного и релевантного предпочтениям пользователя контента, а также общее повышение уровня удовлетворенности от пользования приложением.

Задачей разработчиков веб-приложения становится предоставление максимально релевантной предпочтениям пользователя информации, тем самым улучшая метрики его поведения. Индивидуальная настройка внешнего вида и содержимого

отдельной страницы в соответствии с интересами пользователя является одним из эффективных решений для достижения этой цели. Семантический анализатор, исполняемый на стороне клиента, и генератор семантических атрибутов, исполняемый на стороне сервера, могут производить семантический анализ информации и динамически настраивать расположение и оформление контента в соответствии с нуждами конкретного пользователя.

Предполагаемыми сферами применения подобной архитектуры могут быть приложения, работающие по принципу социальных сетей и отличающиеся большой разнородностью интересов пользователей [3].

Для создаваемой архитектуры были определены необходимые качества:

- Гибкость. Процесс интеграции должен требовать минимальной модификации логики приложения. Разработчик должен иметь возможность добавлять новые методы перестроения содержимого веб-страницы и новые алгоритмы ранжирования частей контента.
- Масштабируемость. Количество пользователей веб-приложения должно оказывать минимальное влияние на время выполнения операции семантического анализа и перестроения пользовательского интерфейса.
- Безопасность. Предпочтения пользователя должны храниться в не персонализированной форме.

Все перечисленные выше качества достигаются архитектурой семантического приложения (рис. 1). Все процессы, за исключением процесса генерации семантического HTML-кода, исполняются на стороне клиента.

В соответствии с основными процессами, представленными выше на диаграмме потоков данных (рис. 1), можно выделить четыре основных компонента создаваемой системы семантического анализа:

- 1) генератор семантического HTML-кода;

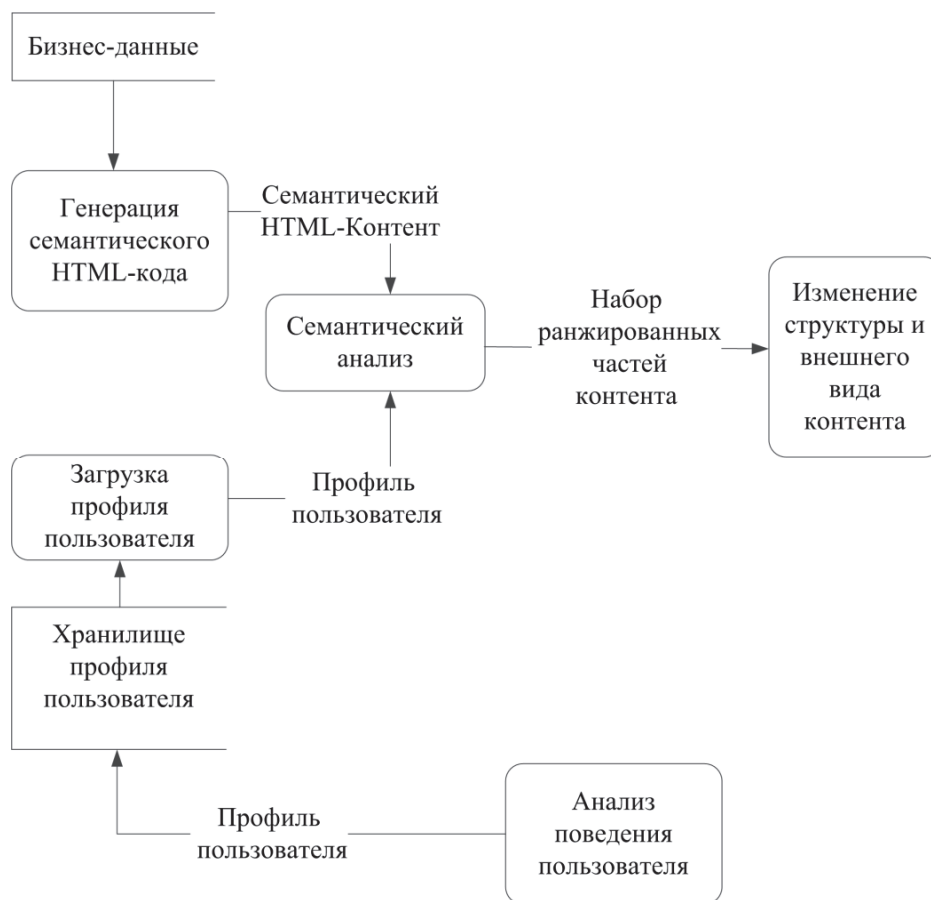


Рис. 1. Диаграмма потоков данных системы семантической оптимизации веб-сайтов

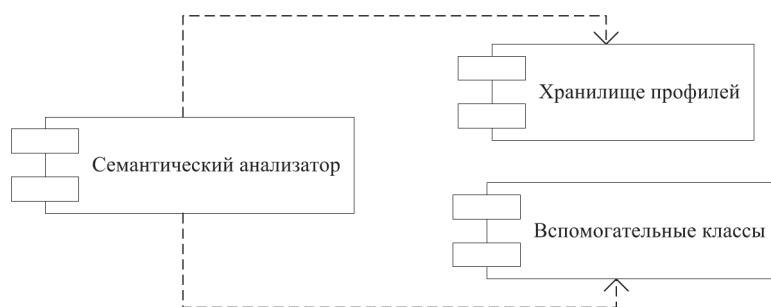


Рис. 2. Диаграмма клиентских компонентов

- 2) хранилище семантических профилей пользователя;
- 3) семантический анализатор;
- 4) библиотека сервисных функций.

Архитектура рассматриваемой системы является распределенной и состоит из двух физических узлов – веб-сервера (среды исполнения веб-приложения) и клиента. Компоненты программной системы, за исключением генератора семантического HTML-кода, исполняются интернет-браузером пользователя (рис. 2).

Генератор семантического HTML-кода – компонент архитектуры, создающий входные данные для семантического анализатора. Генератор семантического HTML-кода добавляет семантическую

информацию к элементам контента, которые будут в дальнейшем проанализированы семантическим анализатором.

Добавление семантической информации к HTML-содержимому реализуется путем использования специальных атрибутов. При данном способе каждому семантически значимому HTML-тегу присваиваются специальные атрибуты, описывающие контент (рис. 3). Значение атрибута представляет собой строку, состоящую из набора слов (тегов), разделенных пробелом: «тег1 тег2 тег3 тег4». При данном способе форматирования можно задавать произвольное число тегов (строковых констант), характеризующих предпочтения пользователя. Данный подход может использоваться в соче-

```
<div semantic="moscow economics foodmarket">...</div>
```

Рис. 3. Пример семантического атрибута

тании с обычным разделением веб-страницы на семантические области, такие как область навигации и основная функциональность область [4].

В настоящее время большинство веб-приложений используют различные вариации MVC-архитектуры. Логика по форматированию и формированию значений семантических атрибутов должна реализовываться в слое представления веб-приложения.

При анализе HTML-документа компонент «Семантический анализатор» использует данные, созданные генератором семантического HTML-кода. Поэтому генератор семантического HTML-кода не имеет прямых отношений использования или ассоциации с другими компонентами архитектуры.

Семантический профиль пользователя – объект для хранения информации о предпочтениях пользователя приложения. Семантический профиль состоит из набора полей с уникальными названиями. Каждое поле имеет количественное значение, измеряемое в дальнейшем оценкой поля, определяющее его релевантность к предпочтениям пользователя. В хранилище семантический профиль представляется в виде строки, состоящей из пар «поле: значение», разделенных пробелами. Примером такой строки может быть строка «moscow:16 foodmarket:7 aircrafts:10 russia:11».

Операции, которые могут выполняться над семантическим профилем:

- Дополнение. К семантическому профилю пользователя добавляются новые поля (предпочтения). Если поле уже присутствует в профиле пользователя, то происходит увеличение оценки поля на требуемое значение.
- Вычитание. Оценка полей профиля, перечисленных во входной строке, уменьшается на требуемое значение. В случае, если оценка поля стала отрицательной или равной нулю, такое поле исключается из профиля пользователя.
- Удаление. Из профиля удаляются теги (предпочтения), перечисленные во входной строке.

Поставщик семантических профилей ответствен за формирование набора характеристик предпочтений пользователя. Хранилище семантического профиля является децентрализованным. Профиль пользователя хранится в объекте *HTML5 LocalStorage* [5]. Данный подход делает архитектуру приложения менее зависимой от конкретной исполняющей среды и СУБД.

Сценарии, при которых целесообразно использовать клиентское распределенное хранилище:

- Большинство пользователей используют персональные устройства для доступа к веб-приложению, такими как интернет-планшеты или коммуникаторы.

- Страницы веб-приложения просматриваются анонимно без использования регистрационных учетных записей.
- Посетители совершают множество действий во время посещения веб-приложения. В результате семантический профиль, если он был утрачен в процессе очистки временных файлов или смены веб-браузера, быстро восстанавливается в процессе самообучения.

Следующие источники могут быть использованы для получения данных о пользователе: социальные сети, опросы (анкетирование) на веб-сайте, статистика поведения пользователя, данные о географическом положении пользователя.

Требования к хранилищу семантических данных:

- Производительность. Время, затраченное на процесс получения семантического профиля пользователя из хранилища, может существенно увеличить время выполнения индивидуальной настройки веб-страницы.
 - Наличие механизмов разграничения доступа между несколькими веб-приложениями.
- Созданное решение для хранения семантических профилей состоит из двух составных частей (рис. 4):

- Веб-страница на удаленном сервере (серверная страница). Основное назначение этой страницы перенаправлять запросы к объекту *LocalStorage* после проверки прав доступа клиента на осуществление операции.
- JavaScript*-библиотека (клиент), представляющая из себя скрипт с программным интерфейсом для доступа хранилищу. Данная библиотека должна быть включена во все веб-страницы, которые подлежат семантической оптимизации. При первом обращении к программному интерфейсу на странице создается объект *iframe*, который ссылается на серверную веб-страницу. В дальнейшем запросы на получение или запись данных в объект *LocalStorage* направляются через объект *iframe*. В объект *iframe* загружается страница с главного домена. Объект *iframe* выступает в роли сервера. На странице, загруженной в объект *iframe*, содержится набор функций для записи и чтения данных из объекта *LocalStorage*.

Перед выполнением любого запроса происходит сопоставление URL-адреса веб-приложения со списком разрешенных доменов. Список разрешенных доменов хранится в *JavaScript*-библиотеке, размещенной на серверной странице. Список разрешенных доменов представляет собой строковую константу, содержащую список доменов любого уровня, разделенных символом пробела. В случае несоответствия домена клиента выполнение

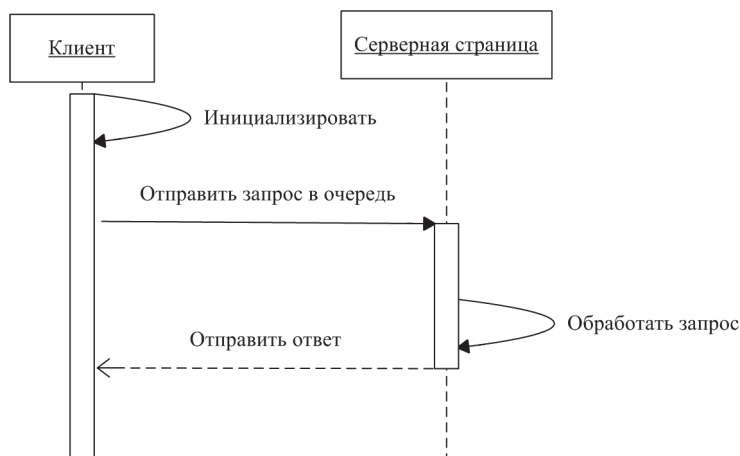


Рис. 4. Процесс обращения к семантическому хранилищу.

скрипта приостанавливается. Данный процесс выполняется на стороне клиента, но оригинальный *JavaScript*-код, загруженный вместе с серверной страницей, не может быть изменен сторонними объектами. Следовательно, исполнение данного процесса на стороне клиента не может негативно повлиять на безопасность приложения.

Разработанная архитектура предполагает, что группа веб-приложений, имеющих достаточно количество общих посетителей, может использовать общий семантический профиль. Данные о поведении пользователя и его предпочтениях могут стать доступными заранее определенному списку веб-приложений. Идентификатором приложения в таком списке является его доменное имя. Подобный подход позволяет получить более обширный набор данных о предпочтениях пользователя для более точного перестроения содержания страницы.

Компонент «Семантический анализатор» ответственен за процесс выборки всех элементов HTML-контента и дальнейшее выявление частичных или полных совпадений значений их семантических атрибутов с набором атрибутов семантического профиля пользователя. Процесс семантического анализа состоит из следующих процессов: получение набора элементов для анализа, установление рейтинга для каждого элемента и выполнение *callback*-функции для каждого из семантических элементов.

Релевантность того или иного элемента содержимого веб-страницы рассчитывается следующим образом:

- Поля семантического профиля располагаются по убыванию их оценки.
- Каждый тег семантического элемента сопоставляется полям профиля. В случае, если тег соответствует полю семантического профиля, происходит начисление рейтинга в зависимости от расположения поля в отсортированном семантическом профиле пользователя. При настройке семантического анализатора указывается шаг уменьшения рейтинга в зависимости от позиции поля семантического профиля.

Оценки за каждое совпадение суммируются. В случае совпадения оценка начисляется по следующей формуле:

$$ratio_i = ratio_0 \times incr^i,$$

где $ratio_i$ – рейтинг, начисляемый за совпадение поля; i – позиция поля в отсортированном профиле пользователя; $incr$ – коэффициент убывания значимости.

По завершении работы семантического анализатора происходит настройка блоков контента в соответствии с предпочтениями пользователя следующими образами:

- а) Изменение уровня прозрачности блоков контента, которые по результатам семантического анализа могут быть нерелевантными профилю пользователя.
- б) Изменение порядка следования HTML-блоков, находящихся на одном уровне иерархии в DOM. Применение данного подхода более целесообразно для пользователей мобильной версии веб-сайта. Мобильные устройства имеют небольшой размер экрана, содержимое страницы мобильной версии интернет-приложения располагается в одной колонке, и пользователь уделяет большее внимание контенту, находящемуся в начале страницы [6].
- в) Изменение оформления. При данном типе перестроения страницы возможно изменения размера, типа и цвета шрифта, добавление специальных графических символов или изменение цвета блока, содержащего семантические атрибуты.
- г) Полное сокрытие нерелевантных блоков. Данный метод применим к узкому кругу веб-приложений. Наиболее целесообразно применять данный способ перестроения страницы, если пользователь явно отмечает свои предпочтения, а возможности самообучения отключены.

Способы изменения внешнего вида страницы, не меняющие порядок следования частей контента, удобны тем, что они не требуют блокировки интерфейса в процессе анализа. Пользователь может

продолжать работать с содержимым страницы и по прошествии нескольких секунд наблюдать результаты анализа.

Созданное решение предлагает разработчику определять собственные *callback*-функции, выполняющие настройку контента путем изменения CSS-атрибутов HTML-элементов или иным способом. Входными параметрами для этой функции являются отсортированный по убыванию значения атрибута *rating* массив DOM-элементов, находящихся на одном уровне иерархии.

Пользователь веб-сайта с регулярно обновляющимся контентом посещает ресурс с некоторой периодичностью. Пользователь открывает для себя новые области знаний или сферы общественной жизни, что может означать изменение или коррекцию его предпочтений. При обычном сценарии использования веб-приложения пользователь не будет каждый раз редактировать свой профиль вручную в соответствии изменившимися настройками. Оптимальным поведением семантического анализатора является наблюдение за поведением пользователя и внесение изменений в его профиль, основанных на анализе поведения. Семантический анализатор отслеживает переходы пользователя по ссылкам, которые находятся внутри HTML-элементов с семантическими атрибутами.

Разработанная программная система может быть интегрирована с существующими веб-приложениями согласно следующей последовательности действий:

1. Определение сущностей, подлежащих семантическому анализу, и их семантических атрибутов. Примерами таких сущностей является статья, новость. Как правило, для семантического анализа выбираются сущности, которые отображаются на веб-странице в виде списка.

2. Создание логики для вывода семантических атрибутов. Данный этап может в себя включать изменение схемы базы данных. Изменение схемы базы данных не потребуется, если анализируемые сущности имеют иерархические отношения с другими сущностями, которые способны поставлять семантические атрибуты.

3. Подключение *JavaScript*-библиотек. Указание списка доверенных доменов. Задание начальной конфигурации анализатора и хранилища семантических профилей.

Процесс интеграции был подтвержден на примере фотоблога и агрегатора новостей.

Выводы

Разработанная архитектура семантического интернет-приложения может быть применена к широкому кругу существующих веб-приложений. Решение позволит разработчикам одновременно улучшить ранжирование интернет-приложения поисковыми системами и повысить удобство использования для посетителей. Произведенные работы по интеграции на примере двух веб-приложений подтвердили, что процесс интеграции не является трудоемким и не требует глубокой модификации уже существующих приложений.

Созданное решение отличается от существующих использованием интернет-браузера в качестве среды исполнения семантического анализатора и распределенным по конечным пользовательским устройствам хранилищем данных. Помимо этого, решение предлагает разделяемые наборы пользовательских профилей между несколькими веб-приложениями.

Созданный набор *JavaScript*-библиотек был опубликован на хостинге проектов с открытым исходным кодом *github.com* в репозитории *semanticOpt* и доступен широкому кругу разработчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Enge E., Spencer S., Stricchiola J., Fishkin R. The art of SEO. Second edition. – Sebastopol, CA: O'Reily, 2012. – 714 p.
2. Agichtein E., Brill E., Dumais S. Improving Web Search Ranking by Incorporating User Behavior Information // SIGIR '06. The 29th Annual International SIGIR Conference Seattle. – WA, USA, 2006. – P. 19–26.
3. Porter J. Designing for the social web. – Berkeley, CA: New Riders, 2008. – 201 p.
4. Semantic HTML // MSDN. 2012. URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/gg671917.aspx> (дата обращения: 10.03.2011).
5. Web Storage W3C Candidate Recommendation 08 December 2011 – W3C. Дата обновления: 08.12.2011. URL: <http://www.w3.org/TR/webstorage/> (дата обращения: 11.05.2011).
6. Lubbers P., Albers B., Salim F. Pro HTML5 Programming: Powerful APIs for Richer Internet Application Development. – Berkeley, CA: Apress, 2010. – 304 p.

Поступила 13.07.2012 г.

УДК 004.021:614.84

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОГО ПОИСКА В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ЛЕСОПОЖАРНОЙ ОБСТАНОВКИ

М.А. Сонькин, Ю.В. Лещик

Томский политехнический университет

E-mail: catlen@ya.ru

Рассмотрены алгоритмы нечеткого поиска в реляционных базах данных. Показано, что использование стандартных алгоритмов текстового поиска и нечетких запросов применительно к системам мониторинга лесопожарной обстановки является недостаточным эффективным. Предложен подход к реализации нечеткого поиска в реляционной базе данных на основе комбинирования стандартных алгоритмов.

Ключевые слова:

Нечеткий поиск, текстовый поиск, нечеткие запросы, нечеткие множества.

Key words:

Fuzzy search, text search, fuzzy queries, fuzzy sets.

Наиболее часто встречающимся в программировании действием является поиск [1]. Методы поиска могут быть классифицированы различными способами [2]. В большинстве случаев под поиском понимают задачу выборки, в которой требуется найти элемент, удовлетворяющий некоторым условиям [3]. Однако возникают ситуации, когда поиск представляет собой нахождение объектов, похожих, в определенном смысле, на заданный объект. В таких случаях принято говорить об использовании алгоритмов нечеткого поиска.

Во многом возникновение задач нечеткого поиска обусловлено проблемами управления качеством данных, в том числе связанными с наличием как в запросах, так и непосредственно в базах данных, ошибок ввода информации [4]. Рассмотрим случай необходимого использования алгоритмов нечеткого поиска в системах мониторинга лесопожарной обстановки.

Системы мониторинга лесопожарной обстановки представляют собой распределенные системы по учету информации о лесных пожарах. Данные из различных подразделений авиационной и наземной охраны лесов передаются в центральный диспетчерский пункт. В «центральной» системе реализован wcf-сервис, позволяющий принимать данные о горимости подразделений в формате xml. Выбор формата обусловлен наличием различных источников отправки данных: наряду с системами мониторинга лесопожарной обстановки могут быть использованы специализированный веб-интерфейс, а также «ручная» отправка – формирование отчетного документа оператором.

Для xml-файла вводятся специальные символьные обозначения: N, N – дробное число; N – целое число; D – дата (без времени); DT – дата (со временем); S – строка (всегда без кавычек); ID – char (10).

Передаваемый документ может иметь следующий вид:

```
<doc name = "S" version = "1">
  <row type = "fire">
```

```
<id>ID</id>
<cOKPO>S</cOKPO>
<dDate>DT</dDate>
<nNumber>N</nNumber>
<pri_kpri id = «ID»>N</pri_kpri>
<ter id=»ID»>N</ter>
<nPl_Obnar>N</nPl_Obnar>
<name_lesh>S</name_lesh>
...
</row>
</doc>
```

Xml-документ состоит из тегов, соответствующих названиям атрибутов таблиц в базе данных. Для организации процедуры поиска необходимы только значения ключевых полей, а именно значения справочников (субъект РФ, код лесопользователя, зона мониторинга и т. д.), а также значения типа «дата/время» или «дата» и имя таблицы (атрибут name тега doc).

Значение ключевых полей передается в следующем виде:

```
<ter id="">69</ter>.
```

Т. е. для элемента ter может быть указано либо значение узла (на примере 69), либо значение атрибута id. Данное правило обусловлено тем, что в таблицах, содержащих справочники, хранятся не только идентификаторы id, но и специализированные коды. Такая схема дает возможность найти, например, субъект Российской Федерации в таблице Tег двумя способами: по уникальному идентификатору записи id, а также по совокупности полей code и nYear. В данном случае code будет содержать в себе значение, заключенное между тегами «ter», а nYear – год, полученный из ключевого поля типа «дата / время» или «дата».

Значения типа «дата/время» должны передаваться в виде:

```
<dDate>15.06.2012 13:25:55< dDate />.
```

После получения xml-файла происходит его проверка на соответствие ряду логических и синтаксических правил, затем осуществляется разбор элементов и поиск объектов в таблицах базы дан-

ных по ключевым полям. В случае если поиск успешно завершен, характеристики найденного объекта заменяются данными из xml-файла. В противном случае пользователю выдается сообщение о том, что искомый объект не найден. В данной ситуации следует учесть, что ошибки могут содержаться непосредственно в значениях узлов и атрибутов. А поскольку за процессом разбора сообщений следит оператор, необходимо предоставить ему возможность заменить значения характеристик одного из объектов базы данных значениями из xml-файла, т. е. сформировать список «похожих» объектов. Таким образом, возникает задача нечеткого поиска объектов в базе данных.

Существуют различные подходы к реализации нечеткого поиска в реляционных базах данных. Одним из подходов является использование нечеткого текстового поиска: искомый объект и запись таблицы базы данных преобразуются в строки путем слияния атрибутов, затем с помощью алгоритмов нечеткого поиска строки вычисляются степень их схожести. В данном подходе под поиском по сходству подразумевается отыскание всех слов, для которых расстояние (метрика) до поискового шаблона не превышает заданную величину.

Наиболее популярная из существующих метрик – это функция Левенштейна–Дамерау. Расстояние Левенштейна равно минимальному числу элементарных операций редактирования, необходимых для преобразования одной строки в другую, в том числе операции замены, вставки и удаления одного символа. В модификации расстояния редактирования, предложенной Дамерау, в множество элементарных операций включены транспозиции символов.

На базе метрики Левенштейна–Дамерау построено большое число поисковых алгоритмов, в т. ч.: сигнатурные алгоритмы, алгоритмы n-граммной индексации, строковые trie-деревья, алгоритмы расширения выборки и последовательного перебора [5]. Одним из наиболее эффективных алгоритмов из приведенных является метод N-грамм.

Вторым подходом к реализации нечеткого поиска в реляционных базах данных является использование нечетких запросов. Механизмы нечетких запросов к реляционным базам данных базируются на теории нечетких множеств, которая была впервые предложена Лофти Заде. Характеристикой нечеткого множества выступает функция принадлежности. Обозначим через $\mu(x)$ степень принадлежности элемента x к нечеткому множеству, представляющую собой обобщение понятия характеристической функции обычного множества. Тогда нечетким множеством S называется множество упорядоченных пар вида $S = \{\mu(x)/x\}$, при этом $\mu(x)$ может принимать любые значения в интервале $[0,1]$. Значение $\mu(x)=0$ означает отсутствие принадлежности к множеству, 1 – полную принадлежность.

Для переменных, относящихся к непрерывному виду данных, функцию принадлежности удобнее

задать аналитической формулой и для наглядности изобразить графически. Существует свыше десятка типовых форм кривых для задания функций принадлежности. Рассмотрим самые популярные кусочно-линейные на рис. 1: треугольную и трапецеидальную.

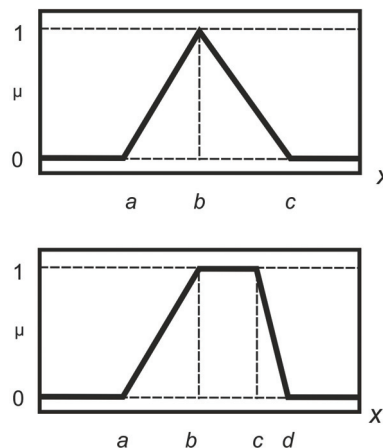


Рисунок. Типовые функции принадлежности

Треугольная функция принадлежности определяется тройкой чисел (a,b,c) , и ее значение в точке x вычисляется согласно выражению:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (1)$$

Аналогично для задания трапецеидальной функции принадлежности, представленной формулой (2), необходима четверка чисел (a, b, c, d) :

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 1, & b \leq x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим указанные подходы применительно к задаче реализации нечеткого поиска для описанных систем мониторинга лесопожарной обстановки. Для создания алгоритма нечеткого текстового поиска будем использовать метод N-грамм. Словарная N-граммная индексация основана на следующем свойстве: если слово u получается из слова w в результате не более чем k элементарных операций редактирования (за исключением перестановок символов), то при любом представлении u в виде конкатенации из $k+1$ -й строки, одна из строк такого представления будет точной подстрокой w . Это свойство можно усилить, заметив, что среди подстрок представления существует такая, что разность между её позицией в строках w и u

не больше k . Таким образом, задача поиска сводится к задаче выборки всех слов, содержащих заданную подстроку.

Функция нечёткого сравнения использует в качестве аргументов две строки и параметр сравнения – максимальную длину сравниваемых подстрок. Подстроки содержат буквы кириллического алфавита и пробел. Результатом работы функции является число, лежащее в пределах от 0 до 1, где 0 соответствует полному несовпадению двух строк, а 1 – полной их идентичности. Сравнение строк происходит по следующей схеме: функция сравнения составляет все возможные комбинации подстрок с длиной вплоть до указанной и подсчитывает их совпадения. Количество совпадений, разделённое на число вариантов, объявляется коэффициентом схожести строк для фиксированного N и выдаётся в качестве результата работы функции, далее берётся среднее значение для всех коэффициентов. Формула релевантности (3) будет выглядеть следующим образом:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N r(i)}{N},$$

$$r(i) = \frac{\text{Match}(Str1, Str2, i) + \text{Match}(Str2, Str1, i)}{\text{Count}(Str1, i) + \text{Count}(Str2, i)}, \quad (3)$$

где $\text{Count}(Str, i) = (\text{len}(Str) - i + 1)$; $\text{len}(S)$ – длина строки S ; $\text{Match}(S1, S2, i)$ = сумма совпадений всех подстрок длиной i из $S1$ в строке $S2$.

Увеличение длины максимальной подстроки приводит к увеличению времени работы функции. С другой стороны, поиск становится более чётким [6].

Если рассмотреть метод N -грамм применительно к строкам, полученным слиянием атрибутов записей таблиц базы данных и объекта xml, то можно сделать вывод о неэффективности такого подхода. Строковые значения специфичны и представляют собой закодированное сообщение, в них могут совпадать преимущественно 2–4 символа, а для числовых значений гораздо результативнее реализовать поиск с помощью нечетких запросов.

Второй подход реализуем с помощью применения нечеткого отношения ОКОЛО к каждому числовому полю. Т. е. следует задать интервал для определения функции принадлежности по формуле (1) [7].

Например, необходимо вычислить функцию принадлежности кода субъекта 30 ОКОЛО значения кода субъекта 50. Зададим интервал для вычисления функции принадлежности: [20; 50].

Используя треугольную функцию, определим функцию принадлежности:

$$\mu(x) = \frac{x - a}{b - a} = \frac{30 - 20}{80 - 20} = 0,6.$$

Данный подход гораздо эффективнее по отношению к числовым полям, чем алгоритм текстового поиска, однако он неприменим к полям строкового типа.

Таким образом, на основании выявленных особенностей применения приведенных подходов к поиску в системах мониторинга лесопожарной обстановки, предлагается использовать комбинированный алгоритм нечеткого поиска. Поскольку оба вышеизложенных подхода позволяют осуществлять поиск с использованием функций «похожести», необходимо использовать нечеткий текстовый поиск для нахождения строковых полей, а механизм нечетких запросов – для нахождения числовых полей и полей типа «дата/время».

В общем виде алгоритм нечеткого поиска записей в таблице базы данных можно представить в виде следующих шагов:

1. Выделяется первая запись в базе данных.
2. Рассматривается первый поисковый признак, сформулированный в запросе, и его значение.
3. По признаку находится соответствующий атрибут базы данных.
4. Определяется тип атрибута: если атрибут строка, то осуществляется переход на шаг 5, если атрибут является значением даты и/или времени, то – переход на шаг 6, в случае числового значения атрибута – переход на шаг 7.
5. Искомое строковое значение из xml, т. е. атрибут id, состоящий из 10 символов, разбивается на 5 N -грамм по 2 символа. Далее для значений соответствующего строкового атрибута в таблице базы данных вычисляется функция релевантности по формуле (3). Значение функции релевантности сохраняется. Переход на шаг 8.
6. Значение дата и/или время преобразуется в число, затем происходит переход на шаг 7.
7. Вычисляется значение функции принадлежности, соответствующей значению признака, в точке, представляющей значение анализируемого атрибута. Полученное значение функции принадлежности запоминается.
8. Рассматривается следующий поисковый признак, и повторяются шаги 3 и 4 до окончания поисковых признаков. В результате будет получен набор значений функций принадлежности и релевантности всех атрибутов анализируемой записи.
9. Основываясь на полученных наборах значений, вычисляется обобщенная оценка принадлежности анализируемой записи объекту из xml (минимальное значение из указанного набора, произведение элементов набора и т. п.). Полученное обобщенное значение запоминается в рабочем поле базы данных.
10. Осуществляется переход на следующую запись и повторяется шаг 2. Повторение происходит до тех пор, пока не будут перебраны все записи. Результатом поиска по нечеткому запросу станет упорядоченная выборка записей по степени их соответствия данному запросу от 1 (полное соответствие) до 0 (полное несоответствие) [8. С. 64–65].

Выводы

Для систем мониторинга лесопожарной обстановки предложен алгоритм с учетом особенностей

типов данных, основанный на комбинировании базовых механизмов текстового поиска методом N -грамм и нечетких запросов. Показано, что алгоритмы нечеткого текстового поиска и нечетких запросов для нахождения записей в реляционных базах данных систем мониторинга не эффективны, поскольку таблицы содержат поля различных типов, в том числе строковые и численные типы, а также

значения «дата/время». Применительно к строковым значениям наиболее результативным является алгоритм нечеткого текстового поиска на базе метрики Левенштейна–Дамерау, поиск численных значений, в которые можно преобразовать поля «дата-время», целесообразно осуществлять с помощью нечетких запросов, основанных на теории нечетких множеств Лотфи Заде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вирт Н. Алгоритмы и структуры данных. – М.: Мир, 1989. – 360 с.
2. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Сортировка и поиск. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – Т. 3. – 824 с.
3. Макконел Дж. Основы современных алгоритмов. 2-е изд. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
4. Караханов Д.С. Использование алгоритмов нечеткого поиска при решении задач обработки массивов данных в интересах кредитных организаций // Аудит и финансовый анализ. – 2010. – № 2. URL: www.auditfin.com/2010/2/toc.asp (дата обращения: 15.05.2012).
5. Бойцов Л.М. Классификация и экспериментальное исследование современных алгоритмов нечеткого словарного поиска // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Труды VI Всеросс. научн. конф. (RCDL'2004). – Пушкино, Россия, 2004. URL: <http://rcdl.ru/doc/2004/paper27.pdf> (дата обращения: 20.05.2012).
6. Караханов Д.С. Использование алгоритмов нечеткого поиска при решении задачи устранения дубликатов в массивах данных // Молодой ученый. – 2010. – Т. 1. – № 8 (19). – С. 150–155.
7. Потапов Е.Н. Нечеткие множества в хранилище данных. 2011. URL: <http://разработка-хл.рф/blog/?p=346> (дата обращения: 01.05.2012).
8. Рыжов А.П. Модели поиска информации в нечеткой среде. – М.: Изд-во ЦПИ при ММФ МГУ, 2004. – 96 с.

Поступила 14.09.2012 г.

УДК 621.313.333:62–83

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С НЕПОДВИЖНЫМ КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ НА ОСНОВЕ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ

А.С. Глазырин, Е.В. Боловин

Томский политехнический университет
E-mail: asglazyrin@tpu.ru

Разработан метод идентификации параметров динамических моделей асинхронных электродвигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе решения системы разностных уравнений. Для цифрового дифференцирования применялась многоточечная аппроксимация первых и вторых производных. Были определены с допустимой погрешностью параметры модели асинхронного двигателя. Доказана работоспособность и эффективность динамической идентификации при использовании разработанного метода.

Ключевые слова:

Асинхронный двигатель, идентификация параметров, разностные схемы.

Key words:

Induction motor, parameters identification, difference schemes.

Введение

Современное производство не может обойтись без электропривода. В электроприводах применяются различные двигатели как по структуре и назначению, так и по возрастной категории. Эффективное управление данными двигателями возможно лишь, если известны текущие значения их параметров. Но зачастую определить параметры либо невозможно, либо крайне сложно. Соответственно, остро встает вопрос об идентификации параметров электродвигателей.

Под идентификацией модели в общем случае понимают определение структуры и ее параметров путем анализа входных и выходных сигналов, по-

даваемых на модель объекта. Основное требование, предъявляемое к процедуре динамической идентификации параметров, является получение несмещённых оценок, стремящихся к истинным значениям искомых параметров. Исходя из этого требования, значительный интерес представляют методы, основанные на решении разностных уравнений, описывающих динамику электродвигателей, или так называемые разностные схемы.

Цель представленной работы – разработать метод идентификации параметров асинхронного двигателя (АД) с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе разностных схем.

Динамическая идентификация параметров электродвигателей

Составим разностную схему для идентификации параметров АД с короткозамкнутым ротором. Согласно [1. С. 21–22] математическую модель двигателя при общеизвестных допущениях можно составить на основе уравнений проекций тока статора и потокосцепления ротора в неподвижной системе координат α, β

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{1\alpha}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha} - \frac{R_{\Sigma}}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\alpha} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \\ &+ \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta} \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\beta} - \frac{R_{\Sigma}}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\beta} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\beta} + \\ &+ \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha} \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} &= -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\alpha} - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta} \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} &= -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\beta} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\beta} + z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha} \\ M_{\Sigma M} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot i_{1\alpha}) \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (M_{\Sigma M} - M_C), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом; R'_2 – приведенное к статору активное сопротивление ротора, Ом; $L_1=L_{1\sigma}+L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки статора, Гн; $L_2=L'_{2\sigma}+L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки ротора, Гн; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн; $L'_{2\sigma}$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн; L_m – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины, Гн;

$R_{\Sigma} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2}$ – эквивалентное сопротивление двигателя, Ом; $U_{1\alpha}=U_{1m} \sin(2\pi f_1 t) = \sqrt{2} U_1 \sin(2\pi f_1 t)$ – синусоидальная составляющая напряжения статора по оси α ортогональной неподвижной системы координат α, β , В; $U_{1\beta}=U_{1m} \cos(2\pi f_1 t) = \sqrt{2} U_1 \cos(2\pi f_1 t)$ – косинусоидальная составляющая напряжения статора по оси β ортогональной неподвижной системы координат α, β , В; $U_{1m} = \sqrt{2} U_1$ – амплитудное значение фазного напряжения статорной обмотки, В; U_1 – действующее значение фазного напряжения статорной обмотки, В; f_1 – частота напряжения статора, Гц; $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – составляющие тока статора в системе координат α, β , А; $\Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ – составляющие потокосцепления ротора в системе координат α, β , Вб; $M_{\Sigma M}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м; M_C – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения

двигателя, Н·м; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ – коэффициент рассеяния; J – момент инерции двигателя, кг·м².

АД работает в составе частотно-регулируемого электропривода. Напряжение на две из трех обмоток подается от автономного инвертора напряжения с синусоидальной ШИМ-модуляцией. Ротор АД остается неподвижным $\omega=0$ рад/с, так как отсутствует крутящий момент. Пульсациями тока, вызванными ШИМ-модуляцией, пренебрегаем, так как несущая частота модуляции много больше номинальной частоты тока.

Тогда (1) можно переписать в виде

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{1\alpha}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha} - \frac{R_{\Sigma}}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\alpha} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + 0 \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} &= -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\alpha} - 0. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

В операторной форме записи система уравнений (2) принимает вид

$$\left\{ \begin{aligned} U_{1\alpha} &= R_{\Sigma} \cdot (T_{\Sigma} \cdot p + 1) \cdot i_{1\alpha} - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} - 0 \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2\alpha} - L_m \cdot i_{1\alpha} - 0, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где $T_{\Sigma} = \frac{\sigma L_1}{R_{\Sigma}}$ – эквивалентная постоянная времени;

ни; $T_2 = \frac{L_2}{R'_2}$ – постоянная времени ротора.

Выразив из второго уравнения системы (3) по-

токосцепление $\Psi_{2\alpha} = \frac{L_m i_{1\alpha}}{(T_2 p + 1)}$ и подставив в первое уравнение, получим

$$U_{1\alpha} = R_{\Sigma} \cdot (T_{\Sigma} \cdot p + 1) \cdot i_{1\alpha} - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \frac{L_m \cdot i_{1\alpha}}{(T_2 \cdot p + 1)}$$

Избавимся от постоянной времени T_2 в знаменателе

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} \cdot (T_2 \cdot p + 1) &= R_{\Sigma} \cdot (T_{\Sigma} \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1) \cdot i_{1\alpha} - \\ &- \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot L_m \cdot i_{1\alpha}; \\ U_{1\alpha} \cdot T_2 \cdot p + U_{1\alpha} &= \\ &= \left(R_{\Sigma} \cdot T_{\Sigma} \cdot T \cdot p^2 + R_{\Sigma} \cdot T_{\Sigma} \cdot p + \right. \\ &\left. + R_{\Sigma} \cdot T_2 \cdot p + R_{\Sigma} - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot L_m \right) \cdot i_{1\alpha}. \end{aligned}$$

Учитывая, что $R_{\Sigma} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2}$, получаем

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} \cdot T_2 \cdot p + U_{1\alpha} &= \\ &= \left(R_{\Sigma} \cdot T_{\Sigma} \cdot T \cdot p^2 + R_{\Sigma} \cdot T_{\Sigma} \cdot p + R_{\Sigma} \cdot T_2 \cdot p + \right. \\ &\left. + R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2} - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot L_m \right) \cdot i_{1\alpha}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & U_{1\alpha} \cdot T_2 \cdot p + U_{1\alpha} = \\
 & = (R_3 \cdot T_3 \cdot T \cdot p^2 + R_3 \cdot T_3 \cdot p + R_3 \cdot T_2 \cdot p + R_1) \cdot i_{1\alpha}; \\
 & U_{1\alpha} + U_{1\alpha} \cdot T_2 \cdot p = \\
 & = R_1 \cdot i_{1\alpha} + R_3 \cdot (T_3 + T) \cdot p \cdot i_{1\alpha} + R_3 \cdot T_3 \cdot T \cdot p^2 \cdot i_{1\alpha},
 \end{aligned}$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования.

Для удобства выполнения дальнейших математических операций произведем замену параметров на коэффициенты $K_1=R_1$, $K_2=R_3(T_2+T_3)$, $K_3=R_3T_2T_3$

$$\begin{aligned}
 & U_{1\alpha} + T_2 \cdot \frac{dU_{1\alpha}(t)}{dt} = \\
 & = K_1 \cdot i_{1\alpha} + K_2 \cdot p \cdot \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} + K_3 \cdot \frac{d^2i_{1\alpha}(t)}{dt^2}.
 \end{aligned}$$

Затем с учётом интервала Δt дискретизации по времени измерительной системы перейдём от дифференциального уравнения к системе разностных уравнений, записанных в матричном виде, относительно текущего t_i и предыдущих $t_{j-xk} = t_j - \Delta tk$ моментов времени при условии постоянства оценок параметров, где $x=0,1,2$; k – коэффициент задержки времени, выбираемый на основе [2]

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} U_{1\alpha_j} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_j \\ U_{1\alpha_{j-1k}} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1k} \\ U_{1\alpha_{j-2k}} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2k} \end{bmatrix} = \\
 & = \begin{bmatrix} i_{1\alpha_j} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_j & \left(\frac{d^2i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_j \\ i_{1\alpha_{j-1k}} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1k} & \left(\frac{d^2i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-1k} \\ i_{1\alpha_{j-2k}} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2k} & \left(\frac{d^2i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-2k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где i_{j-xk} – токи; $\left(\frac{di(t)}{dt} \right)_{j-xk}$ – первые производные

токов; $\left(\frac{d^2i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-xk}$ – вторые производные токов;

U_{j-xk} – напряжения; $\left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-xk}$ – производные на-

пряжения на $j, j-1k, j-2k$ шагах соответственно.

В рамках решения задачи, поставленной в данной статье, считаем известной постоянную времени T_2 . Для нахождения оценок параметров системы вычислим коэффициенты $\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3$, решив систему уравнений (3) методом обратной матрицы

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \hat{K}_1 \\ \hat{K}_2 \\ \hat{K}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{1\alpha_j} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_j & \left(\frac{d^2i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_j \\ i_{1\alpha_{j-1k}} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1k} & \left(\frac{d^2i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-1k} \\ i_{1\alpha_{j-2k}} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2k} & \left(\frac{d^2i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-2k} \end{bmatrix}^{-1} \times \\
 & \times \begin{bmatrix} U_{1\alpha_j} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_j \\ U_{1\alpha_{j-1k}} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1k} \\ U_{1\alpha_{j-2k}} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2k} \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Цифровое дифференцирование

Цифровое дифференцирование является достаточно серьезной проблемой при идентификации параметров [3, С. 127–139]. В основном оно заключается в нахождении идеального метода замены алгебраических производных на специальную функцию, которая может включать в себя лишь значения тока и напряжения в определенные промежутки времени. При неправильной замене происходит смещение оценок или матрицы являются вырожденными, что приводит к недостоверным результатам идентификации.

В данной работе была выбрана следующая методика дифференцирования [4]:

$$\left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_j = \frac{1}{12 \cdot \Delta t} (i_{1\alpha_{j-2}} - 8 \cdot i_{1\alpha_{j-1}} + 8 \cdot i_{1\alpha_{j+1}} - i_{1\alpha_{j+2}})$$

– многоточечная аппроксимация первой производной тока;

$$\left(\frac{d^2i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_j = \frac{i_{1\alpha_{j-1}} - 2 \cdot i_{1\alpha_j} + i_{1\alpha_{j+1}}}{\Delta t^2}$$

– многоточечная аппроксимация второй производной тока;

$$\left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_j = \frac{1}{12 \cdot \Delta t} (U_{16_{j-2}} - 8 \cdot U_{16_{j-1}} + 8 \cdot U_{16_{j+1}} - U_{16_{j+2}})$$

– многоточечная аппроксимация первой производной напряжения.

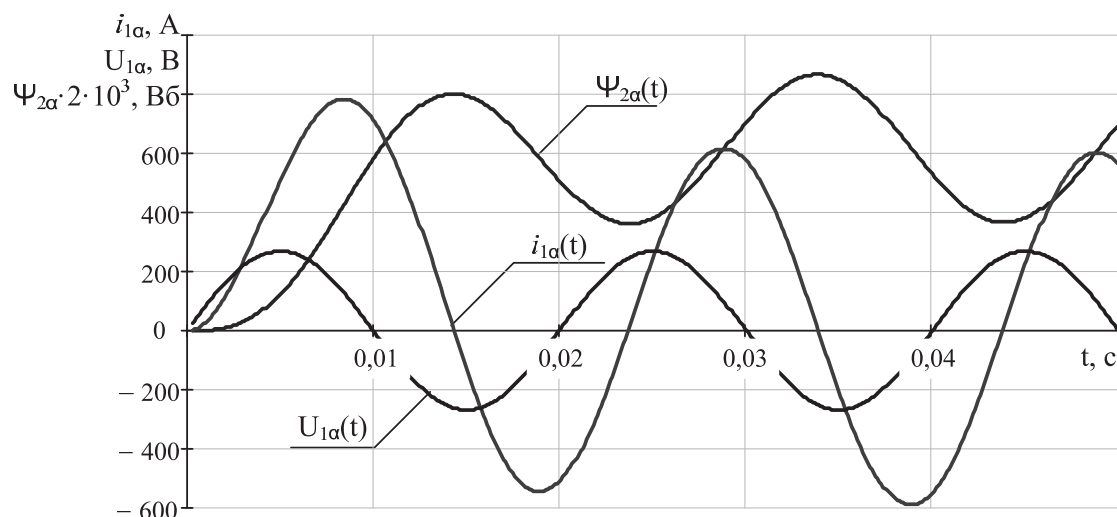


Рис. 1. Переходные процессы тока, напряжения и потокосцепления статора асинхронного двигателя с неподвижным короткозамкнутым ротором

Проверка метода идентификации на основе численного моделирования

Для проверки эффективности рассматриваемого метода идентификации параметров АД с неподвижным короткозамкнутым ротором с применением разработанного выше метода [5] при решении реальных задач проводилось исследование модели двигателя ST132L.

В ходе моделирования были получены переходные характеристики тока, напряжения и потокосцепления статора двигателя (рис. 1).

Построены процессы идентификации для коэффициентов $Kf_1 = \hat{K}_1$, $Kf_2 = \hat{K}_2$, $Kf_3 = \hat{K}_3$ (рис. 2) и проведено их сравнение с реальными значениями. Ошибки оценивания параметров K_1 , K_2 и K_3 равны 3,839, 3,798 и 0,003 % соответственно.

Полученные результаты идентификации параметров модели двигателя показали, что разница между реальными и оцененными значениями параметров составляют не более 4 %.

Выводы

1. Изучена возможность применения метода решения разностных уравнений при динамической идентификации параметров асинхронных двигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором.
2. При нахождении оценок параметров использован метод, основанный на разностных уравнениях, описывающих модель асинхронного двигателя с неподвижным короткозамкнутым ротором, при этом для организации процедуры идентификации необходимо всего два датчика: напряжения и тока, что является несомненным достоинством метода.
3. В ходе модельной апробации метода было выявлено, что погрешности расчета оценок не превышают 4 %, таким образом, процедура идентификации параметров реального асинхронно-

го двигателя методом обратной матрицы работоспособна.

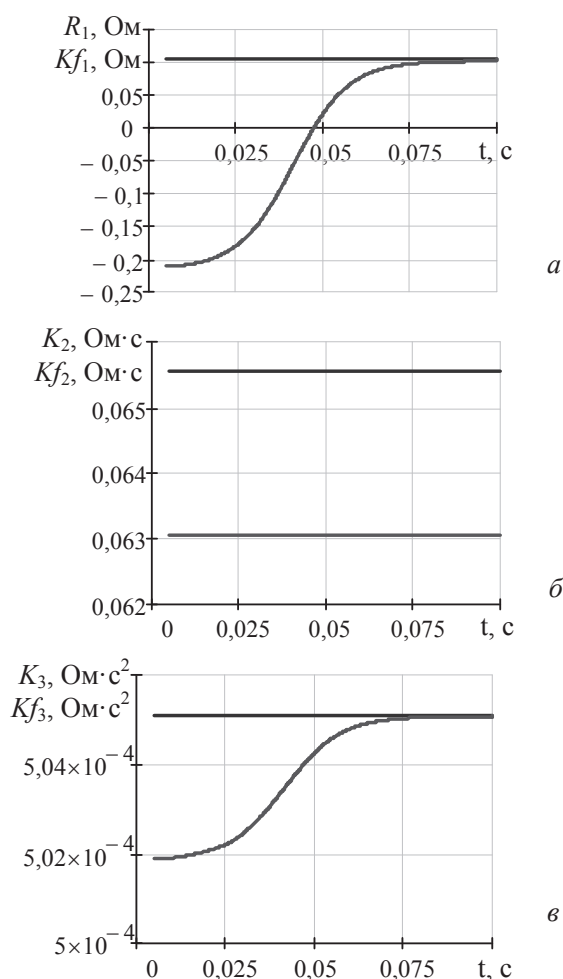


Рис. 2. Переходный процесс оценок коэффициентов а) \hat{K}_1 , б) K_2 , в) K_3 идентификационной модели асинхронного двигателя с неподвижным короткозамкнутым ротором

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – 448 с.
2. Glazyrin A.S., Bolovin E.V. Time delay adjustment for the method of parameter identification of dynamic object // Aktualne problemy nowjcszych nauk-2012: Materiały VIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. – Пшемьсль, 7–15 czerwca 2012. – Przemysl: Nauka i studia, 2012. – Т. 45. – С. 79–81.
3. Копченова Н.В., Марон И.А. Вычислительная математика в примерах и задачах. – М.: Изд-во «Наука», 1972. – 367 с.
4. Кирьянов Д.В. Многоточечные аппроксимации производных // YouTube. 2011. URL: http://www.youtube.com/watch?v=oJ-EFFCfNeHU&list=PL1516D0C35386B45A&index=8&feature=plpp_video (дата обращения 05.10.2012).
5. Глазырин А.С., Боловин Е.В. Разработка и лабораторное опробование метода идентификации параметров электродвигателей на основе разностных схем // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 112–115

Поступила 15.10.2012 г.

УДК 621.313.333.2

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Р.Ю. Ткачук*, А.С. Глазырин

Томский политехнический университет
*ОАО «НПО «Карат», г. Санкт-Петербург
E-mail: Tkachuk.R.U@npo-karat.ru

Предложен метод построения отказоустойчивой системы управления асинхронным электроприводом. Рассмотрены способы адаптации системы управления к переходным процессам, возникающим в электроприводе при смене метода управления. Исследованы переходные процессы в разработанной системе электропривода посредством имитационного моделирования.

Ключевые слова:

Асинхронный электропривод, устойчивость к неисправности, отказоустойчивая система управления.

Key words:

Induction motor drive, fault tolerance, fault-tolerant control system.

Введение

В последнее время большое внимание привлекают отказоустойчивые системы управления (*fault-tolerant control* – *FTC*) электроприводами, способные выявлять зарождающиеся неисправности датчиков и исполнительных механизмов и оперативно адаптировать закон управления таким образом, чтобы сохранить заданные характеристики (качество производства, безопасность и т. д.). Для достижения этой цели система управления реорганизуется таким образом, чтобы использовать наилучший метод управления в соответствии с имеющимися сигналами обратных связей [1].

Одним из способов повышения надежности электропривода с помощью *FTC* является функциональное резервирование, при котором функция регулирования скорости асинхронного электродвигателя может выполняться с использованием замкнутой системы управления с датчиками, замкнутой бездатчиковой системы и разомкнутой системы.

Функциональная схема электропривода переменного тока с отказоустойчивой системой управления

Функциональная схема асинхронного электропривода с отказоустойчивой системой управления приведена на рис. 1. На рис. 1 приняты следующие

обозначения: ПЧ – преобразователь частоты; М – асинхронный электродвигатель; ДС – датчик скорости; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; И1, И2, И3 – системы идентификации; ПКП, ОКП – прямой и обратный координатные преобразователи.

Система управления реорганизуется таким образом, чтобы использовать наилучший метод управления в соответствии с имеющимися сигналами обратных связей. В случае отказа датчика скорости, он заменяется наблюдателем, который преобразует сигналы напряжения и тока статора в необходимую информацию о потокосцеплении и скорости двигателя. В случае отказа датчиков тока и датчика скорости, применяется разомкнутая система со скалярным управлением, чтобы гарантировать работоспособность электропривода.

Система *FTC* включает три модуля идентификации необходимых координат, и две системы управления – векторную и скалярную, переключение между которыми осуществляется в соответствии с табл. 1.

Таким образом, система *FTC* поддерживает электропривод в работоспособном состоянии при отказах датчиков тока и скорости. При таком подходе надежность системы электропривода значительно возрастает.

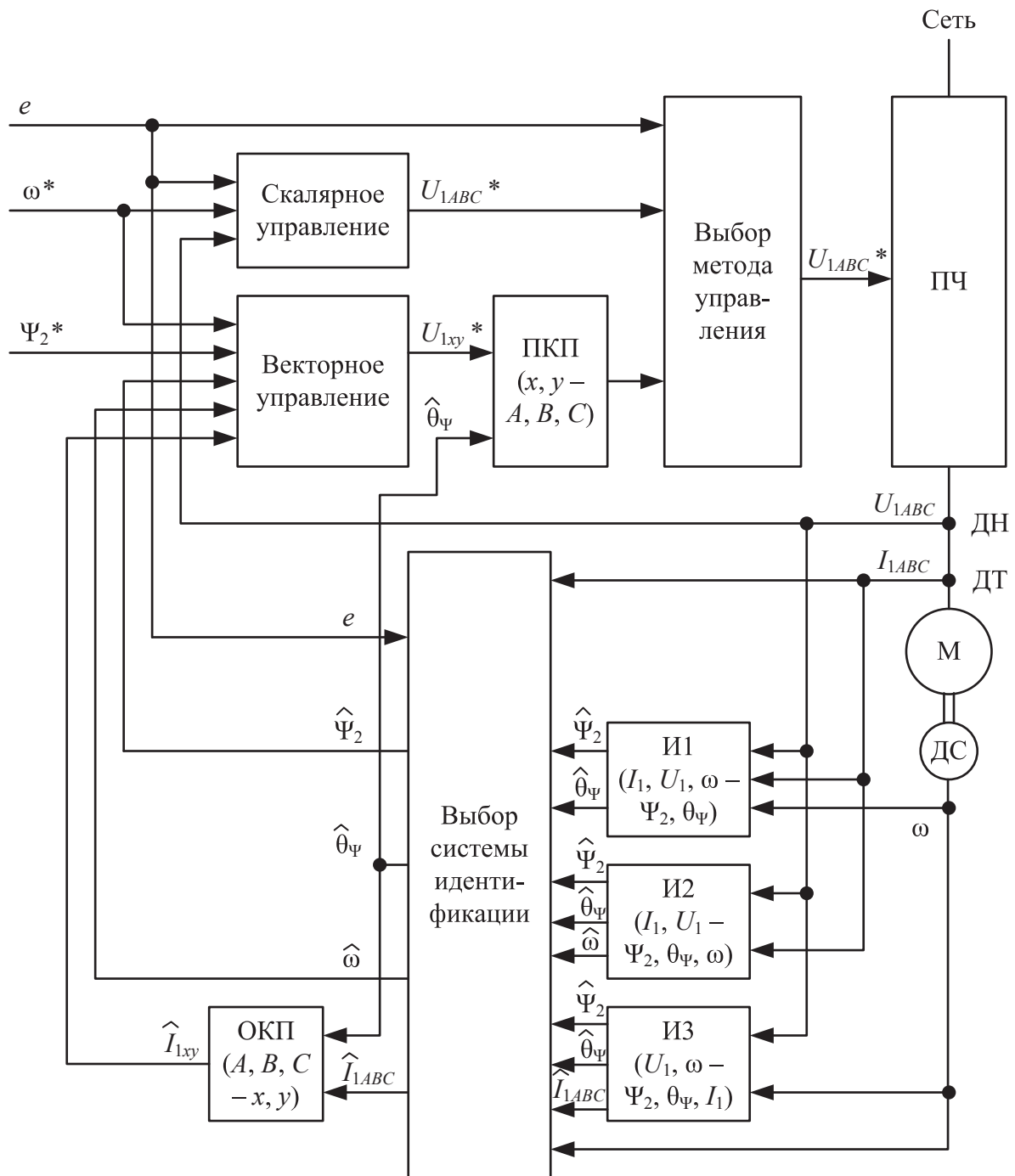


Рис. 1. Функциональная схема электропривода переменного тока с отказоустойчивой системой управления

Таблица 1. Выбор систем идентификации и управления

Логический сигнал неисправности датчика тока, e ,	Логический сигнал неисправности датчика скорости, e_ω	Система идентификации	Система управления
0	0	№ 1	Векторная
0	1	№ 2	Векторная
1	0	№ 3	Векторная
1	1	–	Скалярная

Адаптация системы управления к переходным процессам, возникающим в электроприводе при смене метода управления

В электроприводе с *FTC* (рис. 1) при переходе с векторной системы управления на скалярную возникают ударные моменты, превышающие номинальный момент M_n более чем в 2 раза (рис. 2, 3), что может привести к повреждению электропривода. Броски момента являются следствием мгновенного изменения сигналов задания напряжения ста-

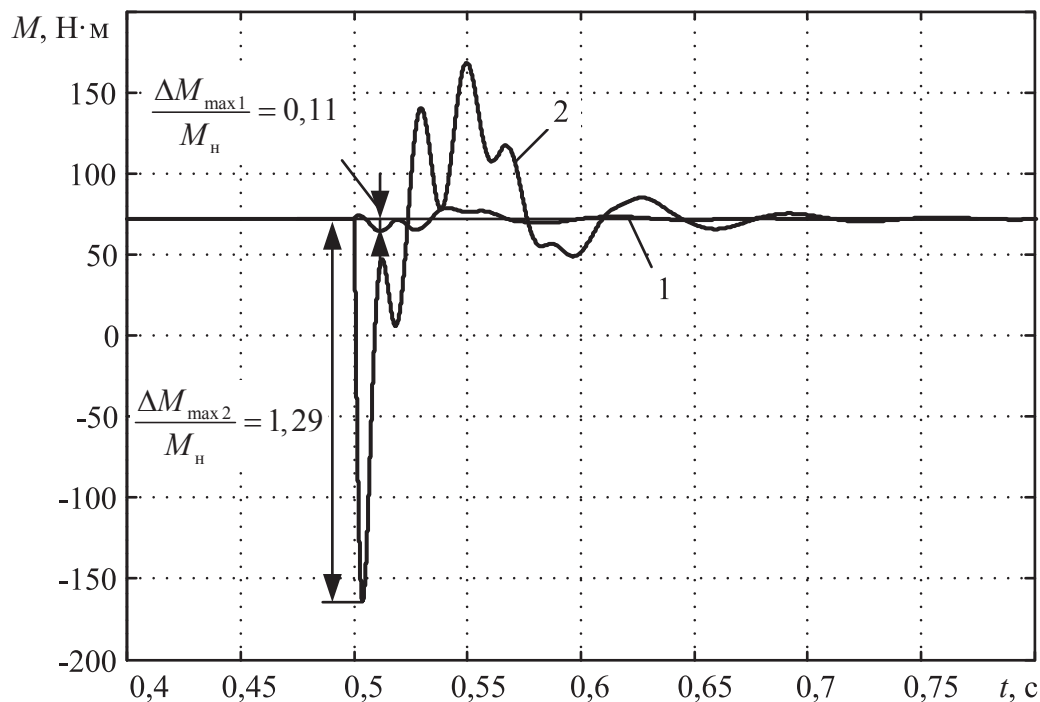


Рис. 2. Графики переходных процессов электромагнитного момента АД в электроприводах с адаптированной (1) и обычной (2) системой скалярного управления при переходе с векторной системы управления на скалярную ($\omega^* = \omega_n$, $M_c = M_n$)

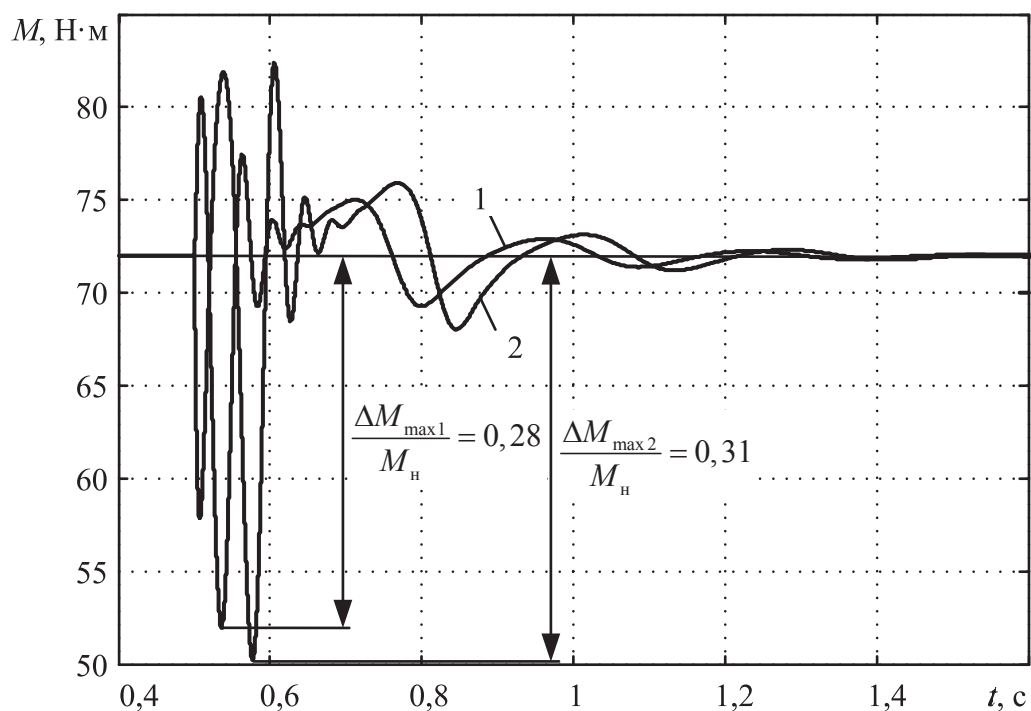


Рис. 3. Графики переходных процессов электромагнитного момента АД в электроприводах с адаптированной (1) и обычной (2) системой скалярного управления при переходе с векторной системы управления на скалярную ($\omega^* = 0,1 \cdot \omega_n$, $M_c = M_n$)

тора. Для их уменьшения необходимо внести изменения в скалярную систему управления, позволяющие принудительно задать вектор напряжений в момент переключения систем управления и ограничить скорость изменения амплитуды напряжения. Адаптированная система скалярного управления представлена на рис. 4, 5.

При появлении сигналов неисправности датчиков тока e_i и скорости e_ω в ЯП записывается угол поворота вектора напряжения статора θ_0 на предыдущем шаге дискретизации. Одновременно с этим начинается расчет угла вектора напряжения в соответствии с частотой, заданной скалярной системой управления, при этом в качестве началь-

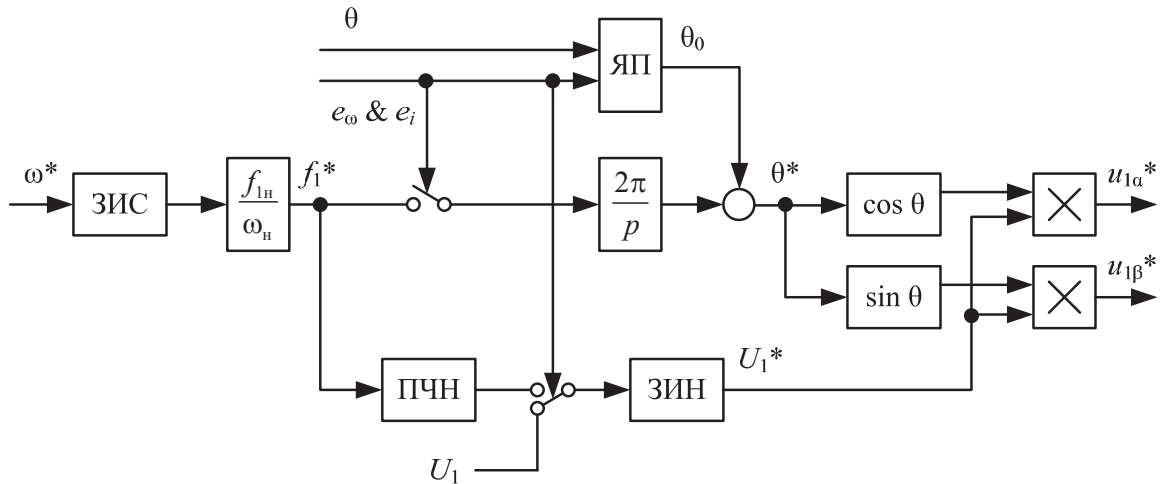


Рис. 4. Функциональная схема системы скалярного управления, адаптированной к переходным процессам, возникающим в электроприводе при смене метода управления (ЯП – ячейка памяти, ЗИС – задатчик интенсивности скорости, ПЧН – преобразователь «частота–напряжение», ЗИН – задатчик интенсивности напряжения)

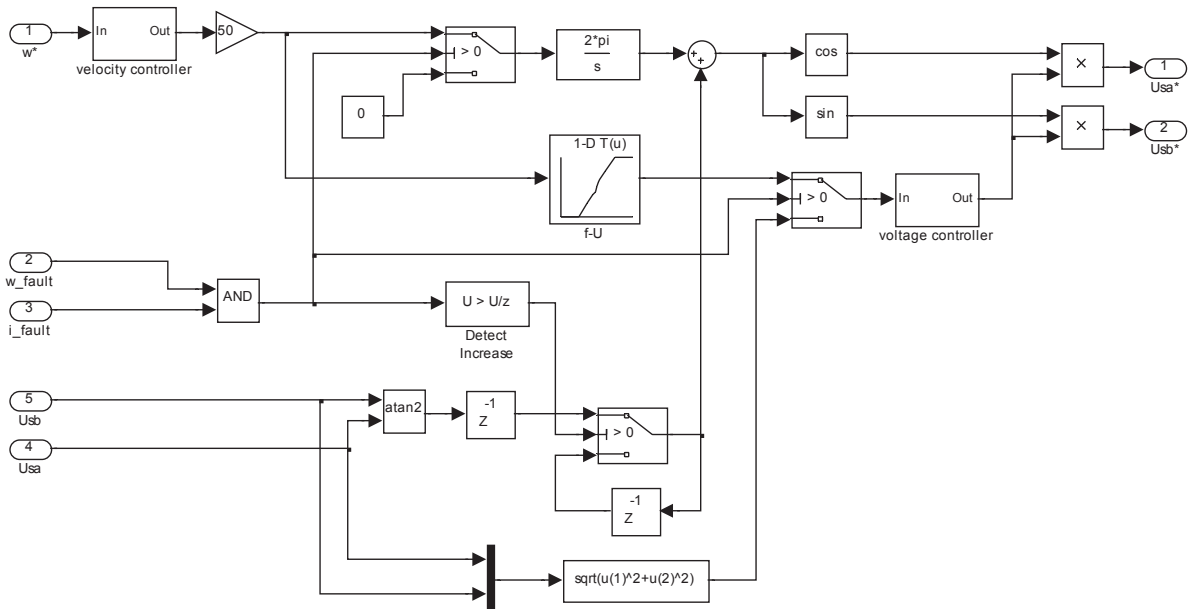


Рис. 5. Имитационная модель системы скалярного управления, адаптированной к переходным процессам, возникающим в электроприводе при смене метода управления

го значения угла принимается записанное в ЯП значение θ_0 . Также производится переключение сигнала задания амплитуды напряжения статора с текущей амплитуды напряжения на заданную скалярной системой управления. Благодаря линейному ЗИН переключение сигнала задания амплитуды напряжения статора происходит плавно. Постоянную времени ЗИН приняли

$$T_{\text{зин}} = \frac{n_{\text{с max}}}{n_{\text{н max}}} T_{\text{зис}} = T_{\text{зис}} = 0,17 \text{ с,}$$

так как при $T_{\text{зин}} > T_{\text{зис}}$ скорость изменения U_1 при пуске и изменении задания на скорость будет меньше, чем заданная ЗИС, при $T_{\text{зин}} < T_{\text{зис}}$ возрастет амплитуда колебаний момента.

Амплитуду колебаний момента при смене метода управления можно регулировать, изменяя $T_{\text{зин}}$.

На рис. 6 приведена зависимость относительной просадки по моменту $\frac{\Delta M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}}$ от $T_{\text{зин}}$, полученная

с помощью имитационного моделирования переходных процессов при переходе с векторной системы управления на скалярную при работе электропривода на номинальной скорости $\omega_{\text{н}}$.

Реакция системы диагностики на неисправность не является мгновенной. Для уменьшения влияния задержки выдачи сигнала неисправности на динамические характеристики электропривода были введены в цепи обратных связей дополнительные сглаживающие фильтры.

Найдены постоянные времени дополнительных фильтров в цепях обратных связей. В худшем случае

временная зависимость сигнала обратной связи при повреждении датчика описывается уравнением:

$$x(t) = x_{\max} e^{-\frac{t}{T_{\text{ф.ос}}}},$$

где x_{\max} – максимальное значение сигнала; $T_{\text{ф.ос}}$ – постоянная времени фильтра в цепи обратной связи.

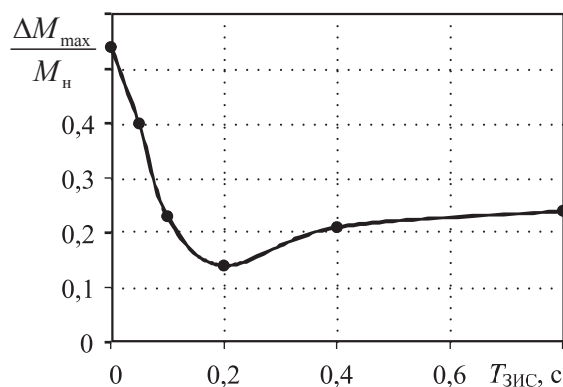


Рис. 6. Зависимость относительной просадки по моменту $\frac{\Delta M_{\max}}{M_n}$ от величины постоянной времени задатчика интенсивности напряжения $T_{\text{зис}}$.

График зависимости $x(t)$ приведен на рис. 7. Отсюда найдена $T_{\text{ф.ос}}$:

$$T_{\text{ф.ос}} \geq -\frac{t_{\text{рн}}}{\ln(1 - \delta_{\text{доп}})},$$

где $t_{\text{рн}}$ – время реакции на неисправность;

$\delta_{\text{доп}} = \frac{\Delta x}{x_{\max}}$ – допустимое относительное отклонение сигнала.

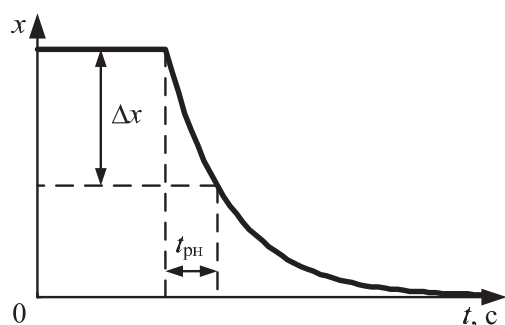


Рис. 7. Временная зависимость сигнала обратной связи при повреждении датчика

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Diallo D., Benbouzid M.E.H., Makouf A. A fault-tolerant control architecture for induction motor drives in automotive applications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2004. – № 6. – С. 1847–1855.
2. Интеллектуальный токовый датчик для управления драйвером электродвигателей // CHIPINFO. 2012. URL: <http://www.chi>

Суммарное время реакции на неисправность интеллектуального токового датчика для управления драйвером электродвигателей *HCPL-788J* компании Hewlett Packard составляет 3,4 мкс [2]. Было принято $t_{\text{рн}}=10^{-5}$ с. Имитационное моделирование показало, что для улучшения динамических характеристик электропривода достаточно $\delta_{\text{доп}}=0,2$. Тогда:

$$T_{\text{ф.ос}} = -\frac{10^{-5}}{\ln(1-0,2)} = 4,48 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

На рис. 8 приведены графики переходных процессов скорости в бездатчиковом асинхронном электроприводе при переключении с системы идентификации № 1 на систему идентификации № 3 при работе электропривода на номинальной скорости ω_n . Для исследования переходных процессов при внезапном отказе датчика скорости по цепи обратной связи подавался сигнал, равный 0.

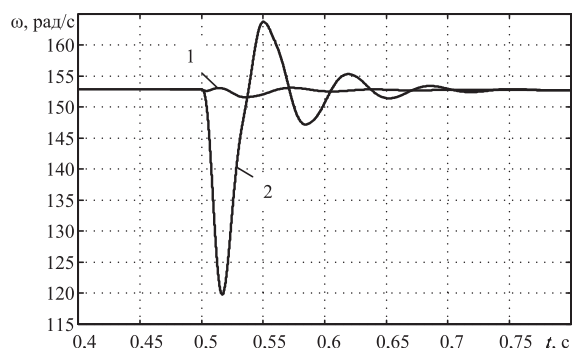


Рис. 8. Графики переходных процессов скорости в бездатчиковом асинхронном электроприводе при переключении с системы идентификации № 1 на систему идентификации № 3 с имитацией повреждения датчика скорости с фильтром (1) и без фильтра (2) в цепи обратной связи

Инерционности в цепях обратных связей необходимо учитывать при оптимизации контуров регулирования векторной системы управления. Их введение приведет к незначительному уменьшению быстродействия электропривода.

Выводы

Разработана отказоустойчивая система управления асинхронным электроприводом, гарантирующая работоспособность электропривода при отказах датчиков токов статора и скорости двигателя.

Применение функционального резервирования датчиков позволило повысить надежности электропривода без увеличения его себестоимости.

pinfo.ru/literature/chipnews/199901/34.html (дата обращения: 19.11.2012).

3. Никифоров В.О., Ушаков А.В. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. – СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. – 232 с.

Поступила 20.11.2012 г.

УДК 681.51.01

СИНТЕЗ ФИЛЬТРА МИНИМАЛЬНОГО ПОРЯДКА ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

С.А. Утанан, В.И. Полищук

Томский политехнический университет

E-mail: polischukvi@tpu.ru

Математически обоснована взаимосвязь между амплитудой и спектральным составом полезного сигнала и уровнем помех в диагностической системе синхронного генератора. Разработан метод синтеза фильтра минимального порядка, обеспечивающего наилучшее соотношение сигнал/шум.

Ключевые слова:

Синхронный генератор, диагностический сигнал, спектральный состав, оптимальная фильтрация.

Key words:

Synchronous generator, diagnostic signal, spectral composition, optimum filtering.

Введение

Системы функциональной диагностики электрооборудования электроэнергетических систем решают задачи распознавания повреждений на ранней стадии их развития с целью предупреждения персонала о своевременной разгрузке электрооборудования, выводе его в ремонт. В ряде способов определения виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора (СГ) требуется выделить полезный сигнал с датчика магнитного поля рассеяния, пропорциональный степени нарушения симметрии магнитного поля рассеяния, от полюсов машины [1, 2]. При этом фильтрация полезного сигнала осложняется его малой величиной (1,5...3 % от основной гармоники), наличием большого количества шумов (высшими гармоническими, импульсными шумами и т. д.). Целью статьи является изложение результатов разработки методики синтеза фильтра минимального порядка для выделения полезного сигнала устройства функциональной диагностики виткового замыкания в обмотке ротора СГ.

Постановка задачи

Требуется разработать оптимальный фильтр, способный надёжно выделить полезный сигнал устойчивой несимметрии полуволн ЭДС промышленной частоты на выходе датчика магнитного поля рассеяния. Оптимальным принимается тип фильтра, который при равной степени выделения полезного сигнала имеет меньший порядок. Несимметрия полуволн проявляется в снижении амплитуды одной из $2p$ полуволн, где p – число пар полюсов СГ. На рис. 1 представлен идеальный сигнал с датчика магнитного поля рассеяния при наличии повреждения для СГ с $p=1$. При этом уровень Δe составляет 1,5 % и выше по отношению к основному сигналу.

Способ выделения полезного сигнала

Для выделения полезного сигнала, пропорционального Δe , ЭДС на выходе датчика преобразовывалась в однополярный сигнал. Разложение в ряд

Фурье (рис. 2, а) показывает, что в таком сигнале выявляются: составляющая f_1 – субгармоническая равная частоте вращения ротора СГ ($f_1=f_s/p$, где f_s – частота сети), постоянная составляющая f_3 , гармоническая составляющая удвоенной промышленной частоты $2f_s$ и частоты, кратные ей [3].

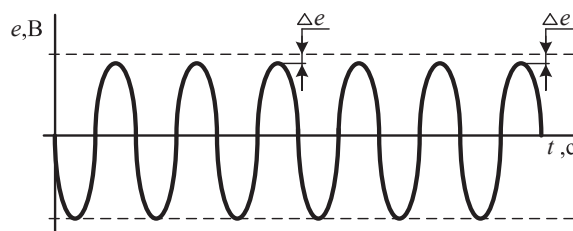


Рис. 1. Вид сигнала с датчика при наличии повреждения в СГ

На рис. 2, б, приведены зависимости уровня амплитуд гармоник от степени несимметрии входного сигнала. Как видно из рис. 2, б, с увеличением несимметрии Δe пропорционально увеличивается амплитуда гармоники f_1 , остальные компоненты однополярного сигнала убывают. Следовательно, полезным информативным сигналом о наличии и величине несимметрии ЭДС на выходе датчика может служить амплитуда гармоники f_1 .

Полученные результаты

Очевидно, что для устройства необходим полосовой фильтр (ПФ), который подавляет постоянную составляющую и гармоническую составляющую удвоенной промышленной частоты, а f_1 пропускает и усиливает. В процессе синтеза ПФ в соответствии с поставленной задачей необходимо получить наименьший порядок ПФ при заданном уровне подавления R_s . Методика синтеза ПФ приводится на примере трех наиболее распространённых типов фильтров: Баттерворта, Чебышева и эллиптического.

Первоначально необходимо определить соотношение амплитуд полезного сигнала к шуму, компонентами которого являются высокочастотные гармонические и постоянная составляющая. ПФ подавит постоянную и гармоническую составляющую

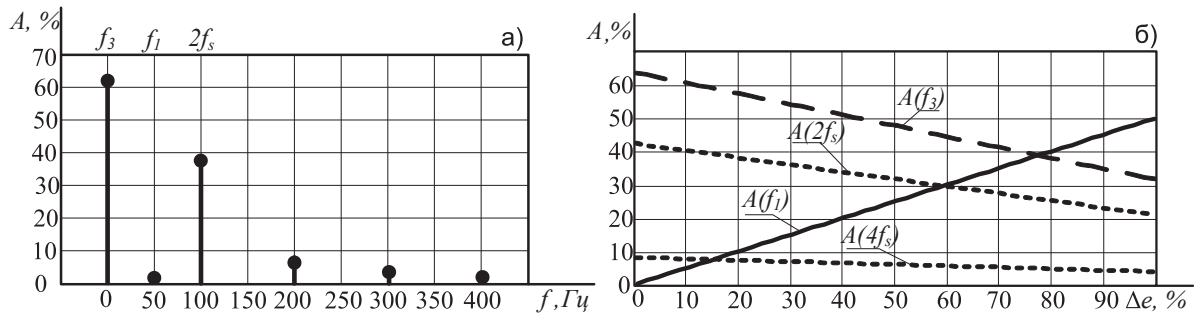


Рис. 2. Спектр частот однополярного сигнала с наличием 1,5 % несимметрии полувольт для СГ с $p=1$

шую удвоенной промышленной частоты, а полезную выделить и усилит.

ПФ выполнен в виде последовательно соединённых фильтра высоких частот (ФВЧ), для подавления постоянной составляющей сигнала, и фильтра низких частот (ФНЧ), подавляющего гармонические $2f_s$ и выше.

Поскольку при синтезе ПФ не предъявляются особые требования к динамике процессов в системе, то в данном случае особых требований к порядку ФВЧ не предъявляется.

Анализ полученного спектра частот рис. 2, а, показывает, что величина $A(2f_s)$ значительно больше других высокочастотных составляющих, следовательно, при качественном подавлении $2f_s$ более высокочастотные гармоники гарантированно будут подавлены.

Для определения уровня подавления R_s гармоники $A(2f_s)$ необходимо знать соотношение полезный сигнал/шум $A(f_i)/A(2f_s)$, при этом R_s будет равен:

$$R_s = 20 \log \frac{A(2f_s)}{A(f_i)}$$

На рис. 3 приведена зависимость необходимого уровня подавления от степени несимметрии. Как видно из рис. 3, для минимально возможной несимметрии полувольт $\Delta e=1,5\%$ необходимый уровень подавления R_s должен составить не менее 60 дБ.

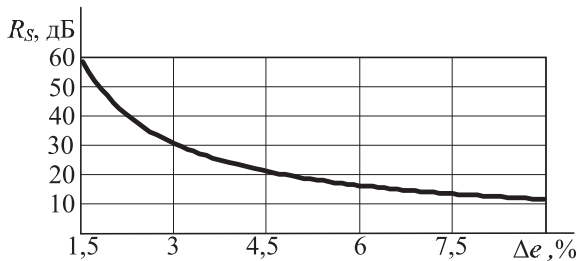


Рис. 3. Величина подавления от степени несимметрии

Для построения ФНЧ с уровнем подавления $R_s=60$ дБ по формулам (1), (2) и (3) были определены порядки фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптического фильтра, а на рис. 4 показана зависимость необходимого порядка фильтров от степени несимметрии при заданном уровне подавления [4].

Порядок ФНЧ по аппроксимации Баттерворта:

$$N_b = \frac{\log \left(\frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right)}{\log \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} \right)}; \quad (1)$$

порядок ФНЧ по аппроксимации Чебышева:

$$N_{ch} = \frac{\operatorname{arch} \left(\frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right)}{\operatorname{arch} \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} \right)}; \quad (2)$$

порядок ФНЧ по аппроксимации Кауэра:

$$N_k = \frac{K' \left(\frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right) K \left(\frac{\omega_0}{\omega_1} \right)}{K \left(\frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right) K' \left(\frac{\omega_0}{\omega_1} \right)}; \quad (3)$$

где N_b, N_{ch}, N_k – порядок фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптического фильтра; R_p – уровень искажения сигнала в полосе пропускания; R_s – уровень подавления сигнала в полосе подавления; ω_0 – частота пропускания; ω_1 – частота подавления; arch – гиперболический арккосинус; K – полный эллиптический интеграл; K' – комплементарный эллиптический интеграл.

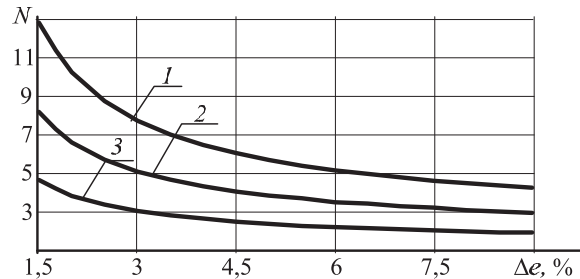


Рис. 4. Зависимость порядка фильтров от степени несимметрии при заданном уровне подавления (1 – по Баттерворту, 2 – по Чебышеву, 3 – по Кауэру)

Как видно из рис. 4, наименьшим порядком для минимально возможной несимметрии Δe обладает эллиптический фильтр.

Учитывая вышеизложенное, для системы диагностики синхронного генератора при заданной степени несимметрии ЭДС на выходе датчика $\Delta e=1,5\%$ был разработан эллиптический ПФ минимального порядка. Порядок ПФ при этом составил $N_k=5$, уровень подавления $R_s=60$ дБ, уровень искажения сигнала в полосе пропускания $R_p=0,5$ дБ. Фильтр состоит из ФВЧ и ФНЧ звена, которые можно представить в виде передаточной функции:

$$H(s) = \frac{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s^1 + a_0 s^0}{b_5 s^5 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s^1 + b_0 s^0},$$

где $H(s)$ – передаточная функция; s – комплексная переменная; a_i, b_i – коэффициенты полинома передаточной функции. Значения этих коэффициентов для вышеуказанного примера представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты ПФ

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
ФНЧ	$7,994 \cdot 10^{11}$	0	$3,168 \cdot 10^6$	0	2,62	0
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
	$7,988 \cdot 10^{11}$	$9,204 \cdot 10^9$	$4,652 \cdot 10^7$	$2,08 \cdot 10^5$	376,5	1
ФВЧ	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
	0	$3,101 \cdot 10^5$	0	$3,852 \cdot 10^4$	0	1
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
	$1,168 \cdot 10^{13}$	$4,457 \cdot 10^{10}$	$2,497 \cdot 10^8$	$5,66 \cdot 10^4$	$1,136 \cdot 10^3$	1

На рис. 5 для данного примера приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) разработанного ПФ, с выделяемой частотой $f_1=50$ Гц, которая показывает, что уровень подавления шума на частоте $2f_3=100$ Гц составил не менее 60 дБ, и это полностью удовлетворяет предъявленным к ПФ требованиям.

Проверка работы ПФ проводилась на основе экспериментальных данных, полученных с установки на базе синхронного генератора ГАБ-4-Т/230. В режиме холостого хода на вход ПФ подавался сигнал с датчика магнитного поля рассеяния, преобразованный в однополярный сигнал $V_{вх}$ (рис. 6, а).

На участке I синусоидальный сигнал симметричен, а на участке II было произведено витковое замыкание 2 % витков обмотки ротора, что привело к появлению несимметрии сигнала. На выходе ПФ наблюдался усиленный в 60 раз полезный сигнал $V_{вых}$. Как видно из рис. 6, б, ПФ качественно выделил полезный сигнал, пропорциональный величине несимметрии полувольт.

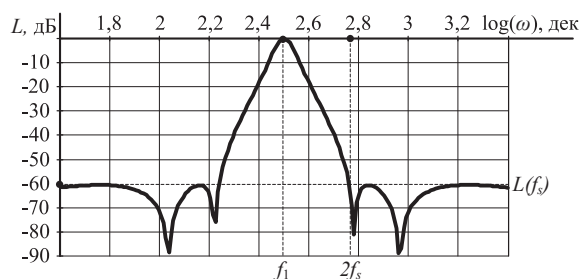


Рис. 5. ЛАЧХ ПФ

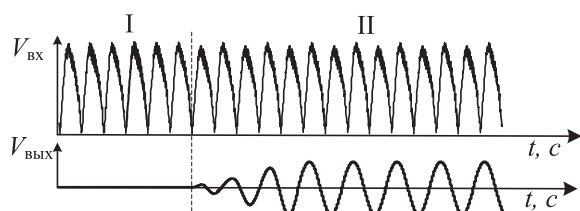


Рис. 6. Фильтрация экспериментального сигнала (I – симметричный сигнал, II – сигнал с несимметрией $\Delta e=2\%$)

Выводы

1. Обоснована зависимость между величиной несимметрии и параметрами полосового фильтра.
2. Получены зависимости, позволяющие разработать полосовой фильтр минимального порядка, удовлетворяющий требованиям разрабатываемой системы диагностики.
3. Экспериментально доказано, что разработанный фильтр обеспечивает качественное выделение полезного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устройство защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора: пат. 22450 (KZ). № 2008/1073.1; заявл. 29.09.2008; опуб. 15.04.2010, Бюл. № 5. – 4 с.
2. Полищук В.И. Построение защиты от виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Известия

Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 57–61.

3. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. – Л.: Энергоатомиздат, 1992. – 192 с.
4. Роуз Дж.Д. Теория электрических фильтров. – М.: Сов. радио, 1980. – 240 с.

Поступила 24.10.2012 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЛИЧИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ И ИХ ЧАСТОТ В ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛАХ НА ОСНОВЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

В.С. Аврамчук

Томский политехнический университет

E-mail: avs@tpu.ru

Предложен и проверен способ определения наличия гармонических составляющих и их частот в дискретных сигналах на основе расчета частотно-временной автокорреляционной функции. Показано, что данный способ позволяет корректно определить наличие периодических сигналов и их частот в анализируемом сигнале.

Ключевые слова:

Цифровой сигнал, корреляционный анализ, автокорреляция.

Key words:

Digital signal, correlation analysis, autocorrelation.

Цифровая обработка сигналов (ЦОС) в настоящее время используется практически во всех областях науки и техники: анализ и распознавание речевых сигналов, сейсмология, радиолокация, медицина, биология, химия и т. д. Одними из наиболее часто решаемых задач ЦОС являются спектральный анализ, цифровая фильтрация и выделение полезного сигнала на фоне интенсивных помех. Для решения последней задачи привлекается математический аппарат корреляционного анализа сигналов. Так, например, взаимная корреляционная функция применяется в задачах обнаружения координат утечек в трубопроводах, по максимальному значению которой судят как о факте наличия утечки, так и о расстоянии до нее. По характеру автокорреляционной функции определяют наличие слабого периодического сигнала в смеси и его период. Несколько сложнее обстоит анализ полигармонических сигналов, трактовка автокорреляционной функции которых весьма затруднительна и зависит от параметров гармонических составляющих сигнала. В этом случае для определения частот гармонических составляющих применяются спектральный анализ и фильтрация сигнала. Использование данного подхода затруднено по нескольким причинам: *во-первых*, спектр полезного сигнала чаще всего неизвестен, а мощность полезного сигнала может быть весьма малой по сравнению с мощностью шума, *во-вторых*, спектр полезного сигнала может перекрываться спектром помех. Эти обстоятельства затрудняют использование указанного подхода. Целью данной работы является расширение возможности использования корреляционного метода анализа сигналов при определении наличия гармонических составляющих и их частот в полигармонических сигналах.

Использование математического аппарата корреляционного анализа основано на свойстве периодичности автокорреляционной функции периодического сигнала. Автокорреляционная функция непрерывного сигнала $x(t)$ при интервале наблюдения $T \rightarrow \infty$ выглядит следующим образом [1]:

$$K(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot x(t + \tau) dt,$$

где τ – величина задержки. Для расчета автокорреляционной функции конечной длины записи применяется следующая формула [1]

$$K(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt. \quad (1)$$

Для функции случайного процесса, представленного одной гармоникой

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где A , ω – соответственно амплитуда и круговая частота гармоники – известны, а φ , фазовый угол гармоники, является случайной величиной, равномерно распределенной на интервале $[0, 2\pi]$, обладающего свойством эргодичности, автокорреляционная функция выглядит следующим образом

$$\begin{aligned} K(\tau) &= \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A \cos(\omega \cdot t + \varphi) \cdot A \cos(\omega \cdot t - \omega \cdot \tau + \varphi) dt = \\ &= \frac{A^2}{2} \cos(\omega \cdot \tau) + \\ &+ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{A^2}{2 \cdot T} \int_0^T \cos(2 \cdot \omega \cdot t + 2 \cdot \varphi - \omega \cdot \tau) dt = \\ &= \frac{A^2}{2} \cos(\omega \cdot \tau). \end{aligned} \quad (3)$$

На основании (3) автокорреляционная функция с ростом τ не стремится к нулю, а её значения меняются с частотой ω – частотой изменения исходного сигнала. Именно этот факт используется для обнаружения и выделения слабого периодического сигнала на фоне интенсивных помех [2, 3], при этом автокорреляционная функция помехи спадает практически до нуля с ростом τ при $\tau > \tau_0$, где τ_0 – интервал корреляции. В случае, когда сигнал представлен суммой независимых между собой составляющих периодического сигнала $x(t)$ и ста-

ционарного шума $n(t)$: $y(t)=x(t)+n(t)$, автокорреляционная функция суммы согласно [2] запишется следующим образом

$$K_y(\tau) = K_x(\tau) + K_n(\tau),$$

причем $K_n(\tau)$ при $\tau > \tau_{0n}$, где τ_{0n} – интервал корреляции шума, приближенно равна нулю. Следовательно, $K_y(\tau)=K_x(\tau)$ при $\tau > \tau_{0n}$. Таким образом, определить наличие или отсутствие в сигнале $y(t)$ периодического сигнала $x(t)$ можно по автокорреляционной функции $K_y(\tau)$. Если при $\tau > \tau_{0n}$ автокорреляционная функция периодична, то в $y(t)$ присутствует гармонический сигнал, частоту которого можно определить. При использовании такого подхода к выявлению периодического сигнала в смеси необходимо отметить некоторые свойства автокорреляционной функции [2]:

- $K(\tau)=K(-\tau)$, т. е. функция $K(\tau)$ является чётной;
- максимальное значение соответствует $\tau=0$ и равно квадрату среднеквадратичного отклонения $K(0)=\delta^2$;
- значения автокорреляционной функции большинства случайных процессов убывают с ростом аргумента τ ;
- если $x(t)$ – синусоидальная функция времени, то её автокорреляционная функция представлена косинусоидой той же частоты (1–3);
- если $x(t)$ – периодическая функция, то $K(\tau)$ для неё может быть представлена в виде суммы автокорреляционных функций от постоянной составляющей и от синусоидально изменяющейся составляющей;
- функция $K(\tau)$ не несёт информации о начальных фазовых углах гармонических составляющих;
- автокорреляционная функция и спектр мощности связаны преобразованием Фурье.

На основании приведенных свойств можно определить наличие периодического сигнала в смеси, однако этот подход, как правило, не приемлем для полигармонических сигналов, которые представляют наиболее широко распространенную группу периодических сигналов

$$x(t) = \sum_{i=0}^N A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n),$$

где A_n , ω_n , φ_n – соответственно амплитуда, круговая частота и фазовый угол гармонической составляющей, N – число гармонических составляющих. Это обусловлено сложностью интерпретации графика полученной автокорреляционной функции. Для устранения этого недостатка воспользуемся частотно-временной корреляционной функцией [4, 5] и ранее приведенными особенностями автокорреляционной функции.

Как известно, автокорреляционную функцию можно получить, используя преобразование Фурье по следующему выражению [1]

$$K(\tau) = F^{-1}[F(x_i)F^*(x_i)],$$

где F – прямое дискретное преобразование Фурье сигнала x_i , F^* – комплексно-сопряженное значение

результатов прямого дискретного преобразования, F^{-1} – обратное дискретное преобразование Фурье. Прежде чем подвергнем произведение $F(x_i)F^*(x_i)$ обратному преобразованию Фурье, составим m его копий M^k , $k=0, \dots, m-1$, предварительно обнулив весь спектр, кроме k -й части. В результате обратного преобразования Фурье каждой из этих копий получим автокорреляционную функцию на соответствующих частотах. Совокупность всех результатов обратного дискретного преобразования Фурье дает частотно-временную автокорреляционную функцию. Формульная запись имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} K(f_k, t_i) &= Z_i^k, \\ Z^k &= F^{-1}[M^k], \\ M_j^k &= \begin{cases} P_j, & \frac{k}{m} \leq \frac{j}{2^{n-1}+1} < \frac{k+1}{m}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \\ P_j &= F(x_i)F^*(y_i), \end{aligned} \quad (4)$$

где x_i – дискретные отсчёты анализируемого сигнала, $i=0, 1, \dots, 2^n-1$, $j=0, 1, \dots, 2^{n-1}+1$, $k=0, 1, \dots, m-1$, $m=1, 2, \dots, 2^{n-1}$, $n=2, 3, \dots$

Блок-схема вычислений, соответствующих условию (4), приведена на рис. 1. Прямое и обратное преобразования Фурье реализованы в форме быстрого преобразования Фурье (БПФ). На входы блоков вычисления прямого преобразования Фурье (БПФ) поступают сигналы x_i и y_i размерностью 2^n .

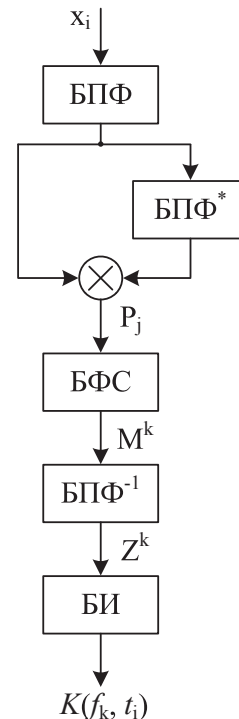


Рис. 1. Блок-схема вычисления частотно-временной автокорреляционной функции: БПФ – блок быстрого преобразования Фурье; БПФ* – блок получения комплексно сопряжённых чисел; БФС – блок формирования сигналов; БПФ⁻¹ – блок быстрого обратного преобразования Фурье; БИ – блок интерпретации

Из полученного произведения P_j в блоке формирования сигналов БФС формируются m сигналов M^k , где $j=0,1,\dots,2^{n-1}+1; m=1,2,\dots,2^{n-1}; k=0,1,\dots,m-1$. Полученные сигналы M^k подвергаются обратному преобразованию Фурье $Z^k=F^{-1}[M^k]$. По результатам обратного преобразования Фурье в блоке интерпретации определяется частотно-временная корреляционная функция

$$K(f_k, t_i) = Z_i^k,$$

где

$$t_i \in [t_{\min}, t_{\max}]; f_k \in [f_{\min}, f_{\max}]; t_i = i \cdot \frac{1}{f_d};$$

$$f_k = \frac{k \cdot f_{\max}}{m-1}; t_{\min} = -\frac{2^{n-1}}{f_d}; t_{\max} = \frac{2^{n-1}-1}{f_d};$$

$$f_{\min} = \frac{f_d}{2^n}; f_{\max} = \frac{f_d}{2};$$

f_d – частота дискретизации сигнала. По полученным результатам можно построить график частотно-временной автокорреляционной функции $K(f,t)$, который визуально иллюстрирует корреляцию гармонических составляющих исследуемого сигнала x_i на различных частотах.

Таблица. Исходные данные и результаты расчета тестовых примеров

№ примера	Частоты гармонических составляющих, кГц	Расчетное значение частоты, Гц
1	5	5000,6250
	6	6004,6875
	7	7008,7500
	8	7993,1250
	9	8997,1875
	10	10001,2500
2	5	5000,6250
	6	6004,6875
	7	7008,7500
	8	7993,1250
	17	17010,0000
	18	17994,3750
3	19	18998,4375
	20	20002,5000
	1	1004,0625
	2	1988,4375
	3	2992,5000
	9	8997,1875
	10	10001,2500
	11	11005,3125
18	17994,3750	
19	18998,4375	
20	20002,5000	

Для демонстрации работоспособности и корректности получаемых данных воспользуемся предложенным способом для расчета частотно-временной автокорреляционной функции $K(f,t)$.

Для этого сформируем несколько тестовых примеров, представленных в таблице. Частота дискретизации тестовых сигналов равна $f_d=44100$ Гц, что соответствует стандартному и широко используемому значению в современных аналого-цифровых преобразователях (АЦП), в частности АЦП звуковых карт персональных ЭВМ. Размер выборки $2^n=2^{14}=16384$ отсчета, количество формируемых сигналов $m=1121$. Амплитуды гармонических составляющих в тестовых примерах приняты равными единице. Результаты анализа тестовых примеров представлены в таблице и приведены на рис. 2.

Полученные частотно-временные автокорреляционные функции ярко выражены на частотах близких к заданным в тестовых примерах, что свидетельствует о наличии в анализируемом сигнале гармонических составляющих и работоспособности предложенного способа определения наличия гармонических составляющих и корректности получаемых данных. Расчетные значения частотно-временной автокорреляционной функции $K(f,t)$ представлены цветом: максимальное значение отображено черным цветом, минимальное – белым, а промежуточные значения – в уровнях серого цвета.

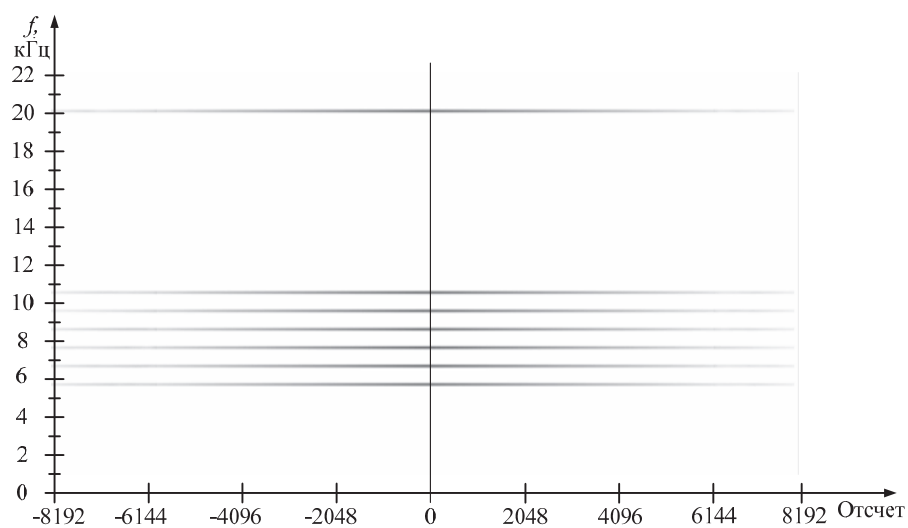
Необходимо отметить, что выбор оптимального значения m осуществляется экспериментальным путем при решении конкретных задач и необходимой точности определения частот гармонических составляющих. Для уточнения частоты гармонической составляющей можно воспользоваться разработанными способами гармонического анализа [6–8] в интересующем интервале частот, при этом точность определения частоты гармоники будет зависеть от выбранного шага перебора по частоте.

Выводы

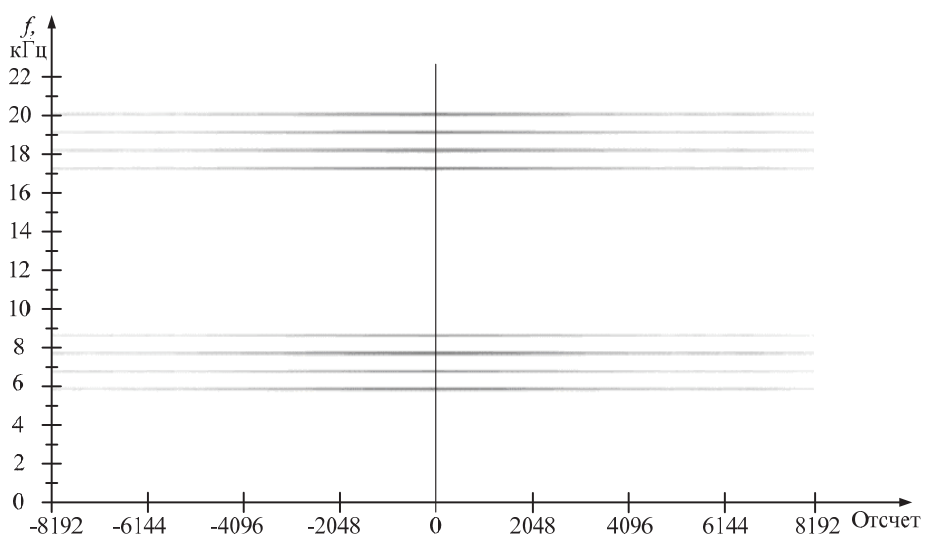
Показано, что использование предложенного способа расчета частотно-временной автокорреляционной функции позволяет определить наличие гармонических составляющих в сигнале и значения их частот на ограниченной по размеру выборке дискретного сигнала.

Наличие гармонических составляющих в анализируемом сигнале определяется по полученной частотно-временной автокорреляционной функции и сводится к выделению на графике горизонтальных линий и выделению частот, соответствующих им. Таким образом, использование приведенного способа расчета частотно-временной автокорреляционной функции расширяет возможности корреляционного анализа при исследовании полигармонических сигналов и непосредственно упрощает процесс их анализа.

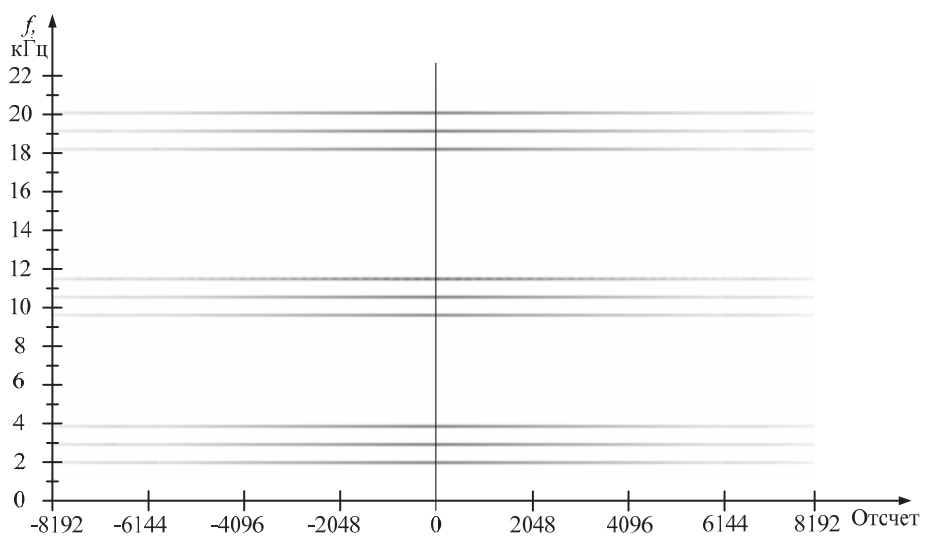
Разработанный способ расчета частотно-временной корреляционной функции может быть использован при решении задач обнаружения утечек, вибродиагностики, обнаружения и анализа слабых периодических сигналов.



Пример 1



Пример 2



Пример 3

Рис. 2. Частотно-временные автокорреляционные функции результатов расчета тестовых примеров

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2008. – 992 с.
2. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Советское радио, 1966. – 680 с.
3. Lee Y.W. Statistical Theory of Communication. – New-York: John Wiley & Sons, Inc., 1960. – 288 p.
4. Способ частотно-временного корреляционного анализа цифровых сигналов: пат. 2405163 Рос. Федерация. № 2009118627/28; заявл. 18.05.09; опубл. 27.11.09, Бюл. № 33. – 10 с.
5. Аврамчук В.С., Чан Вьет Тъяу. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. –Т. 315. – № 5. – С. 112–115.
6. Аврамчук В.С., Яковлева Е.М. Применение решетчатых периодических функций в спектральном анализе узкополосных периодических сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 40–44.
7. Способ спектрального анализа многочастотных периодических сигналов, представленных цифровыми отсчетами: пат. 2229140 Рос. Федерация. № 2003108753/28; заявл. 28.03.03; опубл. 20.05.04, Бюл. № 14. – 6 с.
8. Способ спектрального анализа сложных несинусоидальных периодических сигналов представленных цифровыми отсчетами: пат. 2229139 Рос. Федерация. № 2002133542/28; заявл. 10.12.02; опубл. 20.05.04, Бюл. № 14. – 9 с.

Поступила 17.09.2012 г.

УДК 519.87

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

О.М. Геррет, В.А. Кочегуров

Томский политехнический университет

E-mail: Olgagerget@mail.ru

Обсуждается проблема использования энергетических и информационных показателей для оценки состояния здоровья биообъекта. Изучена динамическая биосистема, которая характеризуется входом, выходом и вектором состояния, изменение которого обеспечивается обменными энергетическими процессами, происходящими внутри и поддерживаемыми поступлением энергии извне. Рассмотрены методы, позволяющие осуществить индивидуализированный подход к принятию решения в задачах практической медицины.

Ключевые слова:

Математические методы, доказательная медицина, энергетические показатели, энтропия, здравоохранение.

Key words:

Mathematical methods, evidence-based medicine, energy indicators, entropy, health service.

Введение

В настоящее время широко обсуждаемыми в научной общественности проблемами в области медицины являются: доказательная медицина и медицина будущего.

В каждой из перечисленных выше проблем можно выделить по два направления. В первой – выявление закономерностей развития в исследуемых объектах и индивидуализированная оценка состояния каждого объекта [1]. Решения задач доказательной медицины могут быть получены только с использованием математических методов. Для выявления закономерностей развития, как правило, широко используются статистические методы, позволяющие определить траекторию функционирования однородных объектов. Однако в большинстве случаев они не дают возможности выявить причинно-следственные связи, которые очень важны в доказательном подходе. Во второй – создание современного инструментария для профилактики здоровья и соответствующих средств лечебно-восстановительной терапии [2].

Обе проблемы и их направления важны и требуют дополнительного исследования. В данной статье более подробно остановимся на направлении создания современного инструментария для профилактики здоровья и оценке состояния здоровья детей в раннем неонатальном периоде с использованием энергетических и информационных показателей.

Энергетические показатели в оценке состояния функционирования биосистемы

В настоящей работе будем рассматривать организм ребенка как некоторую сложную динамическую биосистему. Сложные системы могут качественно отличаться друг от друга – быть физической, экономической, физиологической, социальной и др. природы, однако все они подчиняются законам термодинамики и представляют собой целостный объект с взаимосвязанной структурой, который взаимодействует с окружающей средой. Для того чтобы биосистема существовала, она должна обмениваться с внешней средой информаци-

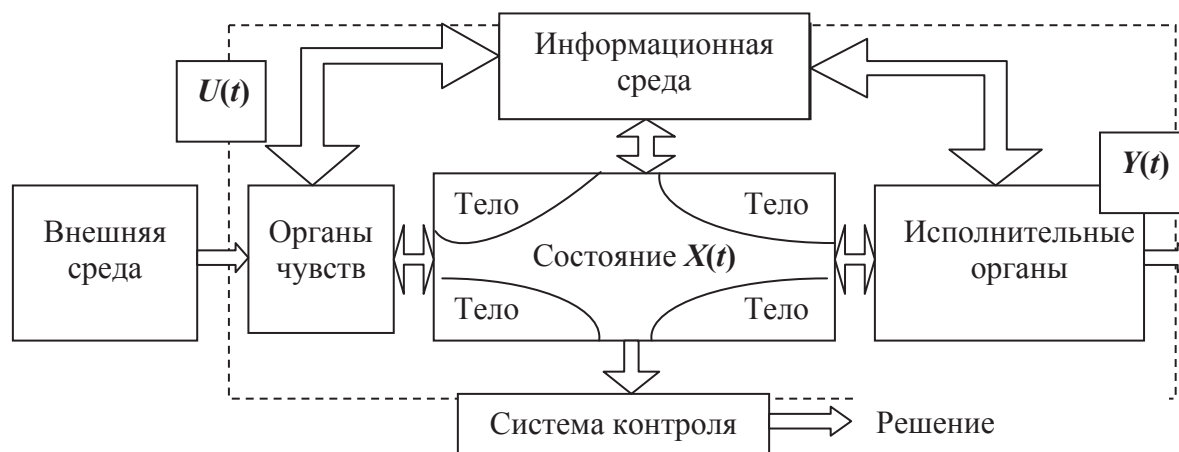


Рисунок. Обобщенная структурная схема, отображающая взаимодействующие элементы организма

ей, энергией и веществом. Обменные процессы в динамической биосистеме подчиняются фундаментальным законам сохранения энергии и непрерывности, а сама жизнь рассматривается с точки зрения действия второго закона термодинамики.

На рисунке представлена динамическая система, которая характеризуется вектором состояния $X(t)$, выходом $Y(t)$, входом $U(t)$.

Динамическая система характеризуется вектором состояния $X(t)$, выходом $Y(t)$, входом $U(t)$.

Изменение состояния $X(t)$ обеспечивается обменными энергетическими процессами, происходящими внутри и поддерживаемыми поступлением энергии извне. В теории управления такие системы, как правило, описываются системными уравнениями [3]:

$$Y(t) = G(X(t), U(t)) \text{ — наблюдение;}$$

$$X(t) = F(\dot{X}(t), U(t)) \text{ — состояние.}$$

Для описания динамических систем воспользуемся энергетическими характеристиками:

$$\Delta W_{\Pi}(t) = \dot{X}^T(t) q_{\Pi} \dot{X}(t) \Delta t \text{ — изменение потенциальной энергии;}$$

$$\Delta W_{K}(t) = \dot{X}^T(t) q_{K} \dot{X}(t) \Delta t \text{ — прирост кинетической энергии;}$$

$$\Delta W_{A}(t) = \dot{X}^T(t) q_{A} \dot{X}(t) \Delta t \text{ — расход энергии на совершение активной работы.}$$

Учитывая баланс энергии, можно записать уравнение следующего вида:

$$\Delta W(t) - \dot{X}^T(t) q_A \dot{X}(t) \Delta t = \dot{X}^T(t) [q_K \dot{X}(t) + q_{\Pi} \dot{X}(t)] \Delta t,$$

где $q_K^{-1} \mathcal{Q}(t) = \dot{X}(t) + q_K^{-1} q_{\Pi} X(t)$ — многомерный гармонический осциллятор, свойства которого определяются начальными условиями $X(t)$, $\dot{X}(t)$ и собственными числами матрицы $q_K^{-1} q_{\Pi}$.

Большой интерес для оценки функционирования состояния здоровья детей в раннем неонатальном периоде представляют суточные и сезонные колебания. В организме ребенка наблюдается широкий спектр колебаний (осцилляций), и их контроль обеспечивается информационной средой,

включающей генетические, нейронные и иммунные системы (биоинформационные системы), которые контролируют качество обменных процессов. Интерес представляет вопрос создания искусственных аналогов таких систем, которые бы адекватно отражали свойства биологической информационной среды. В настоящее время разработаны генетические модели, модели нейронных сетей и иммуно-гуморальных систем [4, 5].

Однако на пути создания аналогов биоинформационных систем возникает ряд проблем. Приведем лишь часть из них:

1. Нормирование сигналов.
2. Оценка принципов взаимодействия структурных элементов информационной среды и использование их в бионических аналогах.
3. Выбор «существенных» переменных состояния, с помощью которых можно осуществить контроль суточных и сезонных колебаний.
4. Ввод понятия напряженности системы через понятие упругости, т. к. колебания определяют упругость (остаточную деформацию) системы.
5. Оценка уровня функционирования системы. Ввод такого понятия позволит делать обоснованные выводы в профилактических исследованиях.

Энтропийные методы для оценки свойств биосистемы

Деградация динамических систем при равновесном функционировании связана с нарушением обменных энергоинформационных процессов, поддерживающих изменение переменных состояния в допустимых пределах. Поэтому обобщенные критерии оценки функционирования динамической биосистемы можно формировать на основе как энергетических, так и информационно-энтропийных показателей.

Энтропия живых систем, являясь мерой неопределенности, позволяет для разных состояний организма человека сделать сравнение их упорядоченности (разупорядоченности) и определенности. При равных вероятностях всех возможных состояний си-

стема полностью дезорганизована, так как во всякий момент времени она может перейти в любое состояние. Такие системы обладают максимальной энергией. Повышение упорядоченности (уменьшение энтропии) означает увеличение зависимости между факторами, определяющими поведение системы, что приводит к предсказуемости поведения системы.

Рассмотрим энтропийный подход для оценки свойств системы. Имеем набор случайных чисел, описывающих состояние биосистемы: $x_1, x_2, \dots, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n = \xi_{2n}$. Рассмотрим два случая, когда указанные числа являются независимыми и попарно зависимыми величинами.

Пусть имеем независимые случайные числа, тогда $\rho(\xi_{2n}) = \rho(\xi_1)\rho(\xi_2)\dots(\xi_{2n})$. Тогда среднее значение энтропии биосистемы равно:

$$\begin{aligned} H_{\xi_{2n}} &= - \int_{\xi} \rho(\xi_{2n}) \ln \rho(\xi_{2n}) d\xi_{2n} = \\ &= - \prod_{\xi}^{2n} \rho_{\xi_i}(\xi_i) \sum_i^{2n} \rho(\xi_i) d\xi_i \dots d\xi_{2n} = \sum_i^{2n} H_{\xi_i}. \end{aligned}$$

Пусть имеем попарно зависимые случайные числа $\dot{x}_1 = f(x_1), \dot{x}_2 = f(x_2), \dots, \dot{x}_n = f(x_n)$. Введем вектора $\vec{y}_1 = (x_1, \dot{x}_1), \vec{y}_2 = (x_2, \dot{x}_2), \dots, \vec{y}_n = (x_n, \dot{x}_n)$, тогда плотность распределения переменной наблюдения запишем в следующем виде:

$$\rho(y) = \rho(\vec{y}_1)\rho(\vec{y}_2)\dots\rho(\vec{y}_n).$$

В данном случае энтропия будет определяться по формуле:

$$\begin{aligned} H_y &= - \int_{\xi} \rho(y) \ln \rho(y) dy = \\ &= - \int_{\xi} \rho(y_1)\rho(y_2)\dots\rho(y_n) \ln(\rho(y_1)\rho(y_2)\dots\rho(y_n)) dy_1 dy_2 \dots dy_n = \\ &= \sum_{i=1}^n H_{\xi_{y_i}}. \end{aligned}$$

В этом случае средняя энтропия определяется по формуле:

$$\begin{aligned} H_{\xi_{y_i}} &= - \int_{\xi_{y_i}} \rho(x_i, \dot{x}_i) \ln \rho(x_i, \dot{x}_i) dx_i d\dot{x}_i = \\ &= - \int_{\xi_{y_i}} \rho(x_i, \dot{x}_i) [\ln \rho(x_i) + \ln \rho(\dot{x}_i)] dx_i d\dot{x}_i = \\ &= - \int_{\xi_{y_i}} \rho(x_i, \dot{x}_i) \ln \rho(x_i) dx_i - \\ &\quad - \int_{\xi_{y_i}} \rho(x_i, \dot{x}_i) \ln \rho(\dot{x}_i) d\dot{x}_i = \\ &= - \int_{\xi_{x_i}} \rho(x_i) \ln \rho(x_i) dx_i - \int_{\xi_{\dot{x}_i}} \rho(\dot{x}_i) \ln \rho(\dot{x}_i) d\dot{x}_i = \\ &= H_{\xi_{x_i}} + H_{\xi_{\dot{x}_i}}, \end{aligned}$$

где $H_{\xi_{x_i}}$ и $H_{\xi_{\dot{x}_i}}$ – средняя и условная средняя энтропия объекта.

Поскольку средняя условная энтропия не превосходит безусловную

$$H_{\xi_{x_i}/\dot{x}_i} \leq H_{\xi_{x_i}}, \text{ то } H_{\xi_y} \leq H_{\xi_{2n}} \text{ и } \Delta H_{\xi_y} = H_{\xi_{2n}} - H_{\xi_y}.$$

Из приведенных выражений следует, что для оценки функционирования биосистемы (организма) необходимо контролировать не только уровни состояния, но и их взаимосвязь. При разных наблюдениях возможны различные методы обработки наблюдаемых величин. Учитывая положительные стороны энтропийных методов, нами была исследована возможность формирования адапционных стратегий детей в раннем неонатальном периоде на основе энтропийного критерия. Работоспособность данного критерия была проверена на клиническом материале, полученном в роддоме № 1 г. Томска. При этом в качестве измеряемых параметров рассматривалось распределение $R-R$ интервалов при проведении клиноортостатической пробы. Клиноортостатическая проба – это экспериментальное выявление реакции организма на переход из горизонтального в вертикальное положение и поддержание этого положения. Показано, что, реакция на клиноортостатическую пробу есть переходная характеристика, позволяющая судить о резервах адаптации и потенциальных возможностях жизненно важных систем организма. В этом случае определяются значения энтропии для исходного (фоновое) состояния (H_0) и после воздействия (H_1) по следующим формулам:

$$\begin{aligned} H_0 &= - \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i, \\ H_1 &= - \sum_{i=1}^n P_{b(i)} \log_2 P_{b(i)}, \quad P_{b(i)} = \frac{P_i \cdot p_i}{\sum_{r=1}^n P_r p_r}, \end{aligned}$$

где P_i и p_i – вероятность попадания интервала $R-R$ в соответствующий класс гистограммы до и после воздействия.

Анализ полученных с помощью энтропийного критерия типов кривых с использованием кластерного анализа, позволил выделить из 16 основных типов динамики данных энтропийных показателей сердечного ритма лишь 6 универсальных типов реакции: субкомпенсированный; неполная компенсация, компенсаторный; гиперкомпенсированный; декомпенсированный; нестабильный тип адаптации [6].

В таблице приведены результаты анализа распределения типа адапционных кардиоинтервалометрических кривых в зависимости от тяжести состояния.

Рассмотренные в статье подходы актуальны для детей раннего возраста и беременных женщин, так как их организм перестраивается на новые условия существования. Запаздывание в принятии решений, корректирующих состояние здоровья челове-

ка в данный период жизни, может привести к «неблагоприятному» исходу.

Таблица. Распределение типов адаптационных кривых (в %) для доношенных здоровых детей и детей с перинатальным поражением центральной нервной системы (ППЦНС)

Тип кривой \ Группа	Здоровые		ППЦНС без лечения		ППЦНС на фоне лечения	
	H_0	H_1	H_0	H_1	H_0	H_1
Субкомпенсированный	28	18	–	–	60	20
Неполная компенсация	18	18	26	4	–	–
Компенсаторный	36	55	14	23	40	47
Гиперкомпенсированный	–	–	19	19	–	13
Декомпенсированный	9	9	7	20	–	–
Нестабильный тип	9	–	34	34	–	20

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В.В. Введение в доказательную медицину. – М.: Медиа Сфера, 2011. – 392 с.
2. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. – М.: Наука, 1987. – 424 с.
3. Константинова Л.И., Кочегуров В.А. Параметрическая идентификация нелинейных дифференциальных уравнений на основе сплайн-схем, точных на многочленах // Автоматика и телемеханика. – 1997. – Вып. 5. – С. 53–63.
4. Ершов Ю.А., Кирков А.И., Костырин Е.В. Вектор состояния подсистем организма как основа автоматизации медицинской

Выводы

Применение энергетических и энтропийных показателей целесообразно при решении задач оценки и прогнозирования состояния здоровья организма человека, поскольку изменение состояния обеспечивается обменными энергетическими и информационными процессами, происходящими внутри и поддерживаемыми поступлением извне. Приведен вывод аналитических выражений, позволяющих получать объективные оценки временных закономерностей. Рассмотренные модели и методы апробированы на реальных данных. Полученные результаты позволяют разработать универсальные типы оценки состояния здоровья детей в раннем периоде.

диагностики // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2004. – Вып. 12. – С. 34–41.

5. Нарциссов Р.П., Степанова Е.И., Кочегуров В.А., Константинова Л.И. Прогнозирование здоровья детей раннего возраста. – Томск: Изд-во ТГУ, 1987. – 157 с.
6. Гергет О.М., Кочегуров А.И. Решение актуальных медицинских задач математическими методами. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co, KG, 2012. – 145 с.

Поступила 13.09.2012 г.

УДК 519.72

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В.А. Фокин*, Я.С. Пеккер*, О.Г. Берестнева, О.М. Гергет

*Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск
Томский политехнический университет
E-mail: fokin@ssmu.ru

Предложена информационная технология интегральной оценки состояния сложных систем (на примере биосистем), обеспечивающая единство оценочного алгоритма на различных уровнях их структурно-функциональной организации. Описан энтропийный подход для оценки нестабильных состояний биосистем по показателям кардиоинтервалографии. Рассмотрены модели и алгоритмы апробированы на реальных данных. Приведен иллюстративный пример основных типов динамики информационных показателей сердечного ритма новорожденных детей.

Ключевые слова:

Информационные технологии, интегральная оценка состояния биосистем, статистическое моделирование.

Key words:

Information technologies, integral estimation of bio-systems state, statistical modeling.

Введение

Решение проблемы оценки состояния сложных биосистем существенным образом зависит от возможностей количественного описания протекающих в них процессов в рамках ограниченной априорной информации в условиях многообразия внешних воздействий и индивидуальных особенностей исследуемого биообъекта. С этой точки зре-

ния важная роль при разработке информационных технологий оценки состояния биосистем отводится формированию, накоплению и использованию массивов многомерных медико-биологических данных [1, 2].

В целом в медико-биологических исследованиях складывается достаточно противоречивая ситуация. С одной стороны, накоплены разнообраз-

ные массивы данных, отражающие всевозможные встречающиеся в медицинской науке и клинической практике ситуации, а с другой – непропорционально малое количество информации, получаемое из их анализа. Это связано с тем, что, несмотря на очевидные успехи, использование математических методов и вычислительной техники в ряде случаев оказывается недостаточно эффективным с точки зрения прикладных целей исследования: попытки точного описания приводят к чрезвычайно сложным для анализа математическим моделям, а данные, полученные в отдельных исследованиях не позволяют получать надежные оценки состояния в условиях широкой внутри- и межиндивидуальной вариабельности биообъектов, характеризующих исследуемое состояние. Как результат, при хороших теоретических построениях практическое применение математических моделей и алгоритмов для количественной оценки состояния биосистем может приводить к широкому разбросу в величине и надежности получаемых оценок.

Существенной особенностью большинства измеряемых медико-биологических показателей является то, что при тех или иных изменениях состояния биосистемы они носят разнонаправленный характер, при этом ряд из них находится в пределах или незначительно выходит за границы статистической нормы. Оценить состояние системы, выделяя какие-либо конкретные показатели из всего множества, бывает достаточно трудно, поэтому особую важность приобретают обобщенные критерии оценки состояния. Более того, такие интегральные оценки состояния, построенные по совокупности многомерных данных, оказываются более чувствительны даже к малым изменениям состояния биосистем.

В работе рассматривается подход к интегральной оценке состояния сложных биосистем на основе концептуальной модели системы многомерных данных. Результаты медико-биологических экспериментов и клинических исследований всегда имеют естественную концептуальную основу для систематизации и интеграции: они относятся к одному и тому же объекту – человеческому организму, поэтому любые наблюдения или измерения не теряют своей значимости и всегда несут в себе потенциальную возможность получения новой информации. Это предъявляет определенные требования к организации систем накопления данных и использованию математических методов их совместного анализа. В модели системы данных должны учитываться возможности по описанию не только непосредственно накопленных данных, но и возможности, необходимые для выявления обобщенных свойств биосистемы [3].

Интегральная оценка состояния биосистем

Методы получения количественной оценки состояния сложных биосистем определяются выбором набора показателей, используемых для ее рас-

чета. На практике наиболее часто встречаются следующие подходы:

- Выбор в качестве оценки состояния небольшого набора независимых показателей, в идеальном случае, одного. При этом количественной оценкой состояния системы служит величина самого непосредственно измеряемого показателя. Однако для сложных систем обнаружить такие показатели, которые бы однозначно определяли ее состояние, бывает достаточно трудно.
- Формирование оценок состояния с использованием методов многомерного статистического анализа данных. Сюда можно отнести всевозможные процедуры многомерного регрессионного, дискриминантного, факторного, кластерного и других многомерных методов анализа [4]. Достаточно эффективно для получения оценок состояния последовательное применение нескольких статистических процедур анализа [5].
- Использование интегральных показателей, формируемых на основе анализа закономерностей функционирования изучаемых биосистем. Это подходы, связанные с построением полуэмпирических индексов состояния, таких как биохимический, клинический индексы; получением оценок функционального состояния организма (уровень функционирования, функциональный резерв, степень напряженности регуляторных механизмов); анализом вербальных данных на основе теории нечетких множеств, применением методов многомерного шкалирования, нейросетевых технологий и т. п. [1, 4–6]. Их можно рассматривать как модельно-независимые оценки, характеризующие систему в целом.

Задача нахождения интегральной оценки сводится к выбору признаков, характеризующих состояние биосистемы и построению функционального отображения их значений в одномерную шкалу. Следует отметить, что оценка состояния S биосистемы всегда производится по отношению к ее эталону состояния S_0 . В качестве последнего для человека может быть выбрано, например, состояние здорового организма [7, 8].

Определение набора показателей x_i , по которым должна производиться такая оценка – трудно формализуемая задача. В целом можно сформулировать следующие общеметодологические требования к построению критериев интегральной оценки состояния биомедицинских систем:

- Математический аппарат, используемый для построения интегрального критерия, должен учитывать вариабельность и наличие взаимосвязей между анализируемыми показателями.
- В интегральный критерий состояния системы должен включаться весь комплекс показателей, характеризующих определенный уровень в иерархическом описании системы.
- Функциональный вид интегрального критерия должен обеспечивать единство оценочного ал-

горитма для различных целевых состояний системы.

- Интегральный критерий должен позволять проводить индивидуализированную оценку состояния объекта исследования.

Разработанные на основе данных требований интегральные критерии оценки состояния биосистем представлены в [2, 8–10]. Рассмотрим возможность использования интегральных показателей на примере анализа сердечного ритма.

Информационный метод оценки нестабильных состояний биосистем

Кардиоинтервалометрия (хронокардиоинтервалометрия) — это метод регистрации синусного сердечного ритма с последующим математическим анализом его структуры. Кардиоинтервалограмма представляет собой последовательный ряд 100 кардиоциклов, записанных во втором стандартном отведении в реальном масштабе времени. Интервал $R-R$ составляет единицу измерения кардиоинтервалограммы. Кардиоинтервалография как динамический ряд значений продолжительности кардиоцикла может рассматриваться как случайный процесс и потому характеризуется функцией распределения. В распределении интервалов $R-R$ хранится информация о состоянии жизненно важных систем человека.

Применение математических методов в анализе сердечного ритма имеет более чем полувековую историю. Ранние методы анализа variability сердечного ритма, как правило, строились на использовании кратковременных ритмограмм и включали в себя простые числовые оценки дескриптивной статистики: меры среднего уровня, меры рассеяния [11]. Начиная с 1970-х гг. стали активно развиваться методы спектрального анализа для исследования биологических систем.

Особый интерес, на наш взгляд, представляют исследования, посвященные оценке и прогнозированию состояния беременных женщин и детей в раннем неонатальном периоде на основе анализа variability сердечного ритма [12]. Среди существующих на сегодняшний день подходов к решению подобных задач в качестве одного из наиболее перспективных следует отметить применение энтропийных методов для анализа сердечного ритма [12, 13].

С этой целью проводился анализ частотных спектров ритмограммы в качестве исходных данных при проведении клиноортостатической пробы, позволяющей отобразить потенциальные возможности функциональных систем ребенка.

Для оценки тенденции изменения параметров был использован подход, основанный на получении семантической информации сложных систем. Выбор мотивирован тем, что одной из важных характеристик «живого» является «принцип неравновесности», а неравновесные процессы в изолированной системе сопровождаются изменением информации.

Величина семантической информации $I_{\text{сем}}$ оценивалась по формуле:

$$I_{\text{сем}} = \sum_{i=1}^n \log_2 \frac{P_{b(i)}}{P_{0(i)}},$$

где

$$P_{b(i)} = \frac{P_i \cdot p_i}{\sum_{r=1}^n P_r \cdot p_r},$$

где $P_{0(i)}$ — вероятность разряда гистограммы до воздействия; P_i и p_i — вероятность попадания интервала $R-R$ в соответствующий класс гистограммы до и после воздействия.

Для решения задачи вычисления вероятностей $P_i, p_i, P_{0(i)}$, входящих в формулы, используется метод построения гистограмм значений динамического ряда кардиоинтервалограммы.

Пусть $[a; b]$ есть диапазон изменения значений интервалов $R-R$, а k определяет число разрядов охватывающих этот диапазон, таким образом, интервал дискретизации вычисляется по формуле:

$$W = \frac{b-a}{k},$$

В соответствии с [14], k необходимо задавать таким образом, чтобы выполнялось неравенство: $W \leq 0,05$ (это условие вытекает из характера функционирования биообъектов и наиболее часто используется при их описании и моделировании).

Определяем последовательность из $k+2$ чисел $\{N_i\}$, где $i=0, \dots, k+1$:

- 1) если $R-R < a$, то $N_0 = N_0 + 1$;
- 2) если $a < R-R \leq b$, то вычисляется

$$J = \frac{R-R_i - a}{W},$$

- и выбирается наибольшее целое число меньше или равное J и $N_i = N_i + 1$;
- 3) если $R-R > b$, то $N_{k+1} = N_{k+1} + 1$.

Данный подход был использован для исследования особенностей сердечного ритма детей в раннем возрасте. В качестве внешнего воздействия использовалась клиноортостатическая проба. На основе анализа показателя $I_{\text{сем}}$ было выявлено 16 основных типов динамики информационных показателей сердечного ритма, среди которых в конечном итоге было выделено 5 основных универсальных типов реакции.

В таблице приведены результаты анализа распределения типа адаптационных кардиоинтервалометрических кривых в зависимости от тяжести состояния.

Значимость различий между частотой появления каждого из типов адаптационной кардиоинтервалометрической кривой при различных состояниях новорожденных детей проверялась методом точного вычисления значимости различий долей (процентов) с использованием углового преобразования Фишера.

Таблица. Распределение типов адаптационных кривых для детей, имеющих перинатальное поражение центральной нервной системы

Группа Тип кривой	Удовлетворительное состояние	Средняя тяжесть	Тяжелые и крайне тяжелые
	I_{cem}	I_{cem}	I_{cem}
Субкомпенсированный	32		
Компенсаторный	42	3	
Гиперкомпенсированный		48	31
Декомпенсированный	26	12	16
Нестабильный тип		37	53

Информационная технология интегральной оценки

Компьютерные технологии и разрабатываемые на их основе программно-технические средства и информационные системы являются универсальным инструментом, используемым в биомедицинских исследованиях и практическом здравоохранении для формирования структурированных массивов данных, их анализа и принятия решений на основе алгоритмов обработки, в соответствии с целями пользователя. Эффективность решения задач интегральной оценки состояния биосистем во многом будет зависеть от разработки соответствующих программно-технических средств, и возможностей их применения к массивам данных в конкретных областях медико-биологических исследований. В [3] представлена структура и компьютерная технология интегральной оценки состояния биосистем, в основу которой положена описанная выше модель интегрированной системы данных.

В соответствии с предлагаемой методологией оценки состояния биосистем, программная и диалоговая архитектура компьютерной системы включает в себя блоки по реализации следующих задач:

- формализованное описание измеряемых показателей предметной области исследований;
- наполнение базы данных результатами исследований;
- интегральная оценка состояния биосистем на основе анализа сформированных по совокупности результатов различных исследований референтных выборок.

Реализация данных задач, с точки зрения разработки средств накопления и переработки данных, является далеко не тривиальной проблемой. Специфика их решения обусловлена тем, что массивы медико-биологических данных имеют, как правило неограниченный объем, являются разнородными (количественными, качественными, текстовыми). В тоже время, результаты анализа данных должны быть понятны и конкретны, а инструменты для обработки «сырых» данных должны быть просты в использовании.

Назначением разрабатываемого инструментального средства является формирование банка

медико-биологических данных с целью оптимизации и поддержки научно-исследовательской деятельности по комплексному анализу и оценке состояния сложных биосистем. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является то, что накопление массивов разнородных показателей в базе данных осуществляется с максимальным учетом атрибутов, характеризующих изучаемое состояние. Это позволяет в дальнейшем эффективно использовать имеющуюся информацию для агрегации референтных массивов данных для получения интегральных оценок состояния исследуемых биосистем.

Разработанная система ориентирована на выполнение следующих функций [3]:

- ввод и хранение экспериментальных данных в базе данных;
- генерация бланков ввода данных;
- формирование выборок референтных данных из базы данных;
- статистическое моделирование массивов данных референтных выборок;
- вычисление интегральных оценок состояния.

Описание предметной области исследований содержится в базе описаний показателей, которая дополняется пользователем по мере необходимости. Единицей записи в ней является описание измеряемого показателя или условий проведения измерения. В базе данных пациентов содержатся такие атрибуты пациента, которые не изменяются от исследования к исследованию или изменяются крайне редко.

База описаний показателей является основой для создания бланков исследований и запросов по формированию референтных выборок. Для этого в разработанной системе предусмотрены два модуля: модуль формирования бланков исследований и модуль формирования запросов. Их включение в систему позволяет наиболее гибко учитывать все разнообразие целей проводимых исследований. Модуль формирования бланков исследований позволяет создавать формы бланков для занесения результатов реального эксперимента, наиболее последовательно и полно отображающих содержание проводимого исследования. Для каждого бланка создается отдельная таблица в базе результатов экспериментов, в которой хранятся все результаты измерений. Модуль формирования запросов ориентирован на проведение «виртуального» исследования, т. е. задание показателей и атрибутов состояния пациентов, для которых референтная выборка данных будет сформирована из имеющейся базы результатов исследований. Модуль статистического моделирования и оценки состояния предназначен для получения интегральных оценок состояния биосистемы.

Кроме перечисленных выше функций в компьютерной системе предусмотрен также ряд дополнительных функций, обеспечивающих удобство взаимодействия с пользователем: экспорт данных в основных форматах, ведение и сохранение про-

токола результатов анализа, встроенная помощь и т. п.

Примеры реализации информационных систем, разработанных авторами на основе данной технологии, представлены в [1, 13–15].

Заключение

1. На основе системного анализа свойств биомедицинских данных предложена концептуальная модель интегрированной системы данных, при разработке которой учитывались системные требования, предъявляемые к формированию массивов биомедицинских данных, существенные для оценки свойств биосистем.
2. Предложены критерии и алгоритмы интегральной оценки состояния биосистем, позволяющие проводить оценку степени происходящих

в ней изменений по отношению к заданному состоянию, по совокупности многомерных данных.

3. Разработан ряд информационных медицинских систем для интегральной оценки состояния биосистем. Программная и диалоговая архитектура включает в себя программные блоки по реализации следующих задач: блок формализованного описания измеряемых показателей предметной области исследований, блок наполнения базы данных результатами экспериментов и блок интегральной оценки состояния на основе анализа референтных выборок, сформированных по совокупности результатов различных экспериментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РГНФ (проект № 12–06–120).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дюк В., Эммануэль В. Информационные технологии в медико-биологических исследованиях. – СПб.: Питер, 2003. – 528 с.
2. Берестнева О.Г., Пеккер Я.С. Выявление скрытых закономерностей в сложных системах // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 138–143.
3. Фокин В.А. Концептуальная модель системы биомедицинских данных // Вестник новых медицинских технологий. – 2005. – Т. 12. – № 1. – С. 118–120.
4. Берестнева О.Г., Муратова Е.А. Компьютерный анализ данных. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 228 с.
5. Миронкина Ю.Н., Бобров А.Ф. Информационная технология статистического синтеза критериев и алгоритмов оценки функционального состояния человека в прикладных медико-биологических исследованиях // Информационные технологии. – 1998. – № 3. – С. 41–47.
6. Гергет О.М., Берестнева О.Г., Глот К.Ю. Исследования состояния биосистем на основе нейросетевых технологий // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – С. 14–22.
7. Баевский Р.М. Оценка и классификация уровней здоровья с точки зрения теории адаптации // Вестник АМН СССР. – 1989. – № 8. – С. 73–78.
8. Ротов А.В., Пеккер Я.С., Медведев М.А., Берестнева О.Г. Адаптационные характеристики человека: Оценка и прогноз. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1997. – 137 с.
9. Берестнева О.Г., Кабанова Л.И., Шаропин К.А. Информационная система оценки профессиональной психофизической

готовности студентов университета // Известия Таганрогского государственного радиотехнического университета. – 2006. – № 11. – С. 40–48.

10. Фокин В.А. Критерий оценки состояния сложных биосистем // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 5. – С. 136–138.
11. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин В.В. и др. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных кардиографических систем // Вестник аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65–87.
12. Эйдукайтис А., Варонцекас Г., Жемайтис Д. Применение теории хаоса для анализа сердечного ритма в различных стадиях сна у здоровых лиц // Физиология человека. – 2004. – Т. 30. – № 5. – С. 56–62.
13. Гергет О.М., Берестнева О.Г. Интеллектуальная система оценки состояния здоровья беременных женщин и детей // Информатика и системы управления. – 2010. – № 2. – С. 61–64.
14. Гергет О.М., Берестнева О.Г., Пеккер Я.С. Автоматизированная информационная система оценки адаптации развивающихся систем // Проблемы информатики. – 2011. – № 2 (10). – С. 76–82.
15. Пеккер Я.С., Киселева Е.Ю., Толмачев И.В. Программный комплекс для оценки и мониторинга состояния матери и плода // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 196–201.

Поступила 28.10.2012 г.

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ТЕЗАУРУСОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТЕКСТОВ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ

И.А. Бессмертный, А.Б. Нугуманова*

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

*Восточно-Казахстанский государственный технический университет

им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

E-mail: igor_bessmertny@hotmail.com, *yalisha@yandex.kz

Рассмотрен метод автоматического построения тезауруса терминов предметной области на основе статистической обработки естественно-языковых текстов. Использование предложенного метода позволяет отказаться от ручного труда экспертов по формированию и поддержанию тезауруса в актуальном состоянии.

Ключевые слова:

Обработка текстов на естественном языке, латентный семантический анализ, векторная модель текста.

Key words:

Natural language processing, latent semantic analysis, vector space model.

Введение

Под тезаурусом предметной области мы понимаем набор ключевых понятий этой области, связанных между собой определенными семантическими отношениями. Основным назначением тезауруса предметной области является предоставление стандартизированной терминологии для описания относящихся к предметной области информационных ресурсов.

Существует два способа построения тезауруса предметной области: ручной способ, с привлечением труда экспертов, и автоматический. Ручной способ отличается высокой трудоемкостью, что делает актуальной проблему автоматического построения тезауруса. Целью данной работы является автоматическое построение тезауруса предметной области с помощью статистических методов обработки текстов на естественном языке. В основе статистических методов лежит предположение о том, что ключевые слова, описывающие содержание предметной области, по-разному распределяются среди релевантных и нерелевантных документов. Термин «релевантность» мы используем здесь в широком смысле, называя релевантными документы, тематика которых относится к заданной предметной области.

Для достижения указанной цели требуется выполнить следующие задачи:

- 1) подготовить обучающую коллекцию, содержащую два класса документов – релевантных и нерелевантных по отношению к заданной предметной области;
- 2) сформировать словарь на основе документов обучающей коллекции;
- 3) выделить из словаря ключевые понятия предметной области;
- 4) построить семантические отношения между извлеченными ключевыми понятиями;
- 5) проверить валидность созданного тезауруса (оценить его применимость для автоматической классификации документов предметной области).

Подготовка обучающей коллекции документов

Подготовка обучающей коллекции представляет собой отбор документов из множества документов, имеющихся в распоряжении исследователя. Ключевым моментом подготовки обучающей коллекции является разбиение документов на «релевантные» (соответствующие предметной области) и «нерелевантные». Поскольку от качества обучающей коллекции зависит качество результатов всей работы по созданию тезауруса, то ее формирование может оказаться итеративным процессом. В ходе проведения экспериментов обучающая коллекция может пополняться, корректироваться, что соответствует возрастающему характеру обучения, заключающемуся в накоплении знаний методом проб и ошибок.

Формирование словаря обучающей коллекции

Под словарем обучающей коллекции документов мы понимаем множество всех слов коллекции, приведенных к нормальной форме. В русском языке нормальными формами являются: для существительных – именительный падеж единственного числа, для прилагательных – именительный падеж единственного числа мужского рода, для глаголов, причастий и деепричастий – глагол в инфинитиве.

Построение словаря состоит из двух этапов: токенизации, т. е. разбиения текстов документов на минимальные лексические компоненты – слова (токены), и лемматизации, то есть приведения выделенных слов к нормальным формам (леммам).

Токенизация является начальным этапом автоматической обработки текстов, и, как отмечается в работе [1], ошибки, допущенные на данном этапе, существенно влияют на дальнейший процесс обработки. Нам известны два основных способа построения токенизаторов. Первый способ заключается в построении токенизатора, способного распознавать в тексте заранее заданные паттерны, второй способ основан на обучении токенизатора

новым паттернам. В данной работе мы используем алгоритм токенизации, основанный на распознавании следующих паттернов:

- пробел и знаки препинания являются разделителями слов-токенов;
- цепочки букв с числами понимаются как один токен;
- двойные имена собственные понимаются как один токен;
- обозначения даты и времени понимаются как один токен;
- специальные сокращения (например, P.S.) понимаются как один токен;
- дробные числа понимаются как один токен;
- имена собственные, включающие инициалы, понимаются как один токен.

Лемматизация необходима для компрессии полученного словника. Лемматизация представляет собой сложную исследовательскую задачу, требующую разрешения неоднозначностей естественного языка, таких как синонимия, омонимия, полисемия. Например, в предложении «Дети ели кашу» для слова «ели» правильным вариантом леммы является глагол «есть», а в предложении «В саду росли ели» правильным вариантом леммы является существительное «ель». В каком значении употреблена словоформа «ели» можно узнать только из контекста, но для этого лемматизатор должен быть усилен модулем синтаксического анализа. В работе [2] был выполнен анализ влияния лемматизации на качество информационного поиска, позволивший авторам работы сделать вывод, что отказ от лемматизатора существенно понижает полноту и точность результатов поиска.

В данной работе для токенизации и лемматизации текстов мы используем свободно распространяемый компонент анализатора, размещенный на сайте [3].

Отбор из словаря ключевых понятий предметной области

Очевидно, что словарь всех слов обучающей коллекции не может являться тезаурусом, поскольку помимо интересующих нас ключевых понятий содержит стоп-слова и другие неинформативные термины.

В данной работе для отсека неинформативных терминов мы используем критерий χ^2 , величина которого позволяет судить о том, насколько независимы между собой определенный термин и предметная область [4]. Выбор данного критерия обусловлен его простотой и универсальностью, которые позволяют применять его в большом количестве самых разнообразных задач, связанных с проверкой согласия модели и опытных данных.

$$\chi^2 = \frac{|TS| \times (TSD_1 \cdot TSN_0 - TSD_0 \cdot TSN_1)^2}{\left\{ (TSD_1 + TSD_0) \cdot (TSN_1 + TSN_0) \times \right. \left. \times (TSD_1 + TSN_1) \cdot (TSD_0 + TSN_0) \right\}} \quad (1)$$

Расшифровка обозначений для выражений, участвующих в расчете критерия χ^2 согласно формуле (1), приведена в табл. 1.

Таблица 1. Выражения, участвующие в расчете критерия χ^2

Параметр	Расшифровка
$ TS $	Мощность множества документов обучающей коллекции
TSD_1	Количество документов обучающей коллекции, которые принадлежат предметной области и содержат данный термин
TSD_0	Количество документов обучающей коллекции, которые принадлежат предметной области и не содержат данный термин
TSN_1	Количество документов обучающей коллекции, которые не принадлежат предметной области и содержат данный термин
TSN_0	Количество документов обучающей коллекции, которые не принадлежат предметной области и не содержат данный термин

Данный критерий мы будем вычислять для каждого входящего в словарь слова. Будем включать слово в тезаурус, если значение критерия для него превышает некоторую положительную величину, которую назовем пороговой. Значение пороговой величины можно варьировать, чем оно выше, тем точнее тезаурус. Однако нужно учитывать, что слишком высокое значение пороговой величины может привести к потере части ключевых слов.

Построение семантических отношений между ключевыми понятиями предметной области

Построение семантической сети, связывающей между собой понятия предметной области, представляет собой сложный и творческий процесс и требует отдельного исследования. В данной работе мы установим ассоциативные связи между извлеченными ключевыми понятиями на основе латентного семантического анализа [5]. Латентный семантический анализ – это метод выявления взаимосвязей между документами текстовой коллекции и терминами, встречающимися в этих документах. В основе метода лежат принципы факторного анализа: выявление латентных связей между изучаемыми объектами и сокращение числа этих объектов за счет объединения групп взаимозависимых объектов. Метод является чисто статистико-алгебраическим, поскольку не использует созданных человеком онтологий для анализа связей.

Для выполнения латентного семантического анализа на множестве документов коллекции мы построим матрицу «термины-на-документы», строки которой соответствуют ключевым словам тезауруса, а столбцы – документам. На пересечении строки (слова) и столбца (документа) укажем частоту вхождения данного слова в данный документ. Каждое слово в матрице будет представлять собой вектор-строку, а каждый документ – вектор-столбец. Согласно теореме о сингулярном разло-

жении полученная матрица может быть представлена в виде произведения трех матриц:

$$A = USV^T, \quad (2)$$

где A – это исходная матрица; U – ортогональная матрица размеров $m \times n$; V – ортогональная матрица размеров $n \times n$; S – диагональная матрица размеров $n \times n$, элементы которой на главной диагонали упорядочены по убыванию (рис. 1).

Ненулевые элементы матрицы S из (2) называются сингулярными числами матрицы и равны арифметическим значениям квадратных корней из соответствующих собственных значений матрицы AA^T .

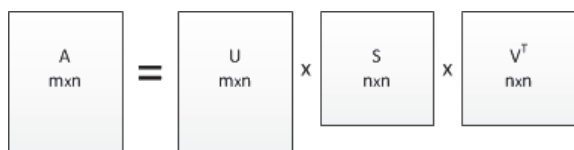


Рис. 1. Сингулярное разложение матрицы

Такое разложение обладает тем свойством, что если в матрице S оставить только k наибольших сингулярных значений, а в матрицах U и V – только соответствующие этим значениям столбцы и строки, то произведение получившихся матриц (матрица A') будет наилучшим приближением матрицы ранга k к исходной матрице A [6].

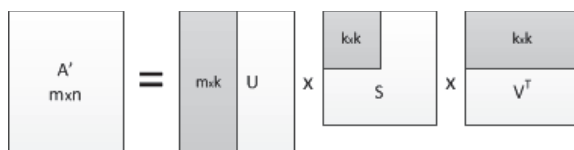


Рис. 2. Аппроксимация исходной матрицы матрицей меньшего ранга

Получившаяся матрица A' (рис. 2) точнее отражает структуру связей в исходной коллекции [5]. Исходя из этой матрицы, мы можем оценить близость между словами коллекции как расстояние между соответствующими векторами при помощи косинусной меры (3) или евклидова расстояния (4).

$$c = \cos(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{\bar{x} \cdot \bar{y}}{|\bar{x}| \cdot |\bar{y}|}, \quad (3)$$

$$\rho = \rho(\bar{x}, \bar{y}) = \sqrt{\sum (x_i - y_i)^2}, \quad (4)$$

где c – это косинусная мера; ρ – евклидово расстояние; x, y – это строки и столбцы, представляющие документы или термины, в новой матрице A' .

Проверка валидности тезауруса (оценка применимости тезауруса для классификации документов)

Чтобы проверить валидность полученного тезауруса, используем его для автоматической классификации документов по двум классам: класс документов предметной области и класс документов, не относящихся к предметной области. В качестве метода классификации используем метод Роккио.

Выбор данного метода обусловлен простотой и естественностью его геометрической интерпретации. Кроме того, как отмечено в [7], «качество классификации, прежде всего, зависит от выбора классификационных терминов», и в меньшей степени – от выбора алгоритма. Разумеется, речь идет о сравнении между такими известными алгоритмами, как машина опорных векторов, наивный байесовский классификатор, алгоритм К-ближайших соседей [7, 8].

Описание векторной модели представления документа. Метод Роккио, как и большинство других методов классификации, представляет документ в векторном пространстве терминов тезауруса как вектор, координаты которого равны весам терминов в данном документе:

$$\bar{d} = (w_1, w_2, \dots, w_T),$$

здесь T – размерность тезауруса (количество терминов); \bar{d} – вектор, представляющий документ; координаты w_i ($i=1 \dots T$) – веса терминов в документе.

Для расчета весов мы используем модель TF-IDF (Term Frequency – Inverse Document Frequency), согласно которой вес термина в документе прямо пропорционален частоте его вхождения в документ и обратно пропорционален количеству документов, в которых он встречается:

$$w_i = F_i \cdot \log\left(\frac{D}{DF_i}\right),$$

где w_i и F_i – вес и частота термина i в документе соответственно; D – общее число документов; DF_i – число документов, в которых встречается термин i .

Данная модель не учитывает того факта, что документы могут иметь разную длину, вследствие чего частота термина, а значит и его вес будут тем меньше, чем больше длина документа. Мы выполним нормирование весов терминов в документе путем их деления на евклидову норму (длину вектора-документа):

$$w_i^* = \frac{w_i}{d} = \frac{w_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^T w_i^2}}.$$

Описание алгоритма классификации. Суть алгоритма Роккио заключается в вычислении близости между векторами документов и центроидом класса документов, относящихся к предметной области. Под центроидом понимается усредненный вектор класса

$$\bar{\mu}_D = \frac{1}{|TSD|} \sum_{i:d_i \in TSD} \bar{d}_i,$$

где TSD – это подмножество обучающей коллекции, состоящей из документов, относящихся к предметной области; d_i – это документы, принадлежащие множеству TSD .

Документ будет считаться принадлежащим предметной области, если расстояние между центроидом класса и вектором документа будет меньше определенной величины, которую назовем ра-

диусом класса. Под расстоянием между векторами мы понимаем евклидово расстояние, вычисляемое по формуле (4).

Оценка качества классификации. Основными показателями качества классификации являются уровни ошибок первого и второго рода [9]. Ошибка первого рода или ложный пропуск (false negative) фиксируется, когда документ, относящийся к заданному классу, ошибочно не обнаруживается. Ошибка второго рода или ложное обнаружение (false positive) фиксируется, когда документ, не относящийся к заданному классу, ошибочно полагается относящимся.

Пусть экспериментальная выборка содержит S документов, в том числе SD документов, относящихся к предметной области, и SN документов, не относящихся к ней. Очевидно, что $S=SD+SN$. Используя эти величины, можно рассчитать процент уровней ошибок первого и второго рода.

$$nFN = \frac{FN}{SD} \times 100 \%,$$

$$nFP = \frac{FP}{SN} \times 100 \%,$$

где nFN и nFP – проценты уровней ошибок первого и второго рода соответственно; FN и FP – количество ложных пропусков и ложных обнаружений соответственно.

Экспериментальная часть

Для проведения экспериментов мы выбрали предметную область «Автомобили». Нами была подготовлена обучающая коллекция из 2000 документов, представляющих собой статьи, опубликованные на новостном сайте [10]. Из них половина документов относилась к предметной области «Дорожное движение», половина – к другим предметным областям (культура, наука, финансы и т. д.).

В результате токенизации и лемматизации из текстов обучающей коллекции был сформирован словарь объемом в 53745 приведенных к нормальной форме слов. К словам словаря был применен критерий χ^2 , который позволил выделить 567 ключевых понятий предметной области «Дорожное движение». Пороговое значение критерия χ^2 было взято равным 18. В табл. 2 приведены первые 30 слов с наивысшим значением критерия, а в табл. 3 – последние 10 слов с наименьшим значением критерия.

Затем мы выполнили поиск ассоциативных связей между словами тезауруса. С этой целью была сформирована матрица «термины-на-документы» размерностью 567 (по числу терминов тезауруса) на 1000 (по числу документов обучающей коллекции, относящихся к предметной области). В ячейках матрицы были записаны частоты вхождения терминов в документы. С помощью сингулярного разложения полученная матрица была аппроксимирована матрицей ранга 200. В табл. 4, 5 показаны фрагменты матрицы «термины-на-документы» до и после сингулярного разложения.

Таблица 2. Первые 30 ключевых терминов предметной области «Дорожное движение»

Слово	Значение χ^2
Автомобиль	1303,05
Машина	859,96
Водитель	665,37
ГИБДД	485,39
Дорожный	458,34
Дорога	398,97
ДТП	396,17
Транспортный	352,87
Авария	300,38
Километр	298,01
Полоса	247,24
Руль	241,44
Скорость	232,22
Газета	231,69
Автомобильный	222,89
Произойти	219,35
Трасса	207,16
Автомобилист	203,11
Транспорт	199,91
Автовладелец	186,98
Уголовный	185,90
Легковой	180,26
Пострадать	178,37
Ехать	178,12
Погибнуть	175,62
Район	175,46
Внедорожник	166,85
Гаишник	164,89
МВД	164,52
Пробка	164,52

Таблица 3. Последние 10 терминов предметной области «Дорожное движение»

Слово	Значение χ^2
Человек	18,94
Город	18,89
Остановить	18,62
Купе	18,51
Наземный	18,51
Подушка	18,51
Ярославский	18,51
Сократиться	18,41
Вправо	18,38
Эвакуатор	18,38

Таблица 4. Фрагмент матрицы «термины-на-документы» до сингулярного преобразования

Термины \ Документы	Документы						
	1	2	3	4	5	6	7
1	8	7	0	0	0	5	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	7	0	0	0	0	0	0
4	1	1	3	4	2	0	16
5	4	1	0	1	2	0	0
6	3	1	0	1	3	0	0
7	2	0	0	0	0	0	0

Таблица 5. Фрагмент матрицы «термины-на-документы» после сингулярного преобразования

Документы \ Термины	1	2	3	4	5	6	7
1	8,0520	7,0977	-0,0011	-0,1328	-0,0810	4,9294	0,0244
2	1,3677	-0,0972	0,0968	0,4338	-0,1015	0,0249	0,0005
3	6,3477	-0,0353	0,0826	0,1404	-0,1713	-0,1026	-0,1166
4	1,0124	1,0247	3,0212	4,0735	1,9890	0,0292	15,9325
5	4,1900	1,1507	-0,0763	1,1001	2,0669	-0,1085	-0,0437
6	2,8336	0,9321	0,0714	0,9574	3,0026	0,0182	0,0163
7	1,5220	0,3381	0,0642	0,0258	0,1325	-0,0916	0,0259

Таблица 6. Фрагмент матрицы «термины-на-термины» попарной близости терминов

Термины	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0,222758	0,300158	0,202998	0,385061	0,39617	0,280362
2	0,222758	1	0,199121	0,155349	0,337179	0,289496	0,19304
3	0,300158	0,199121	1	0,095526	0,197616	0,191545	0,270208
4	0,202998	0,155349	0,095526	1	0,151962	0,214588	0,13238
5	0,385061	0,337179	0,197616	0,151962	1	0,768539	0,557483
6	0,39617	0,289496	0,191545	0,214588	0,768539	1	0,586044
7	0,280362	0,19304	0,270208	0,13238	0,557483	0,586044	1

Таблица 7. Семантический кластер слова «Автомобиль»

Первый термин в паре	Второй термин в паре	Близость
Автомобиль	Машина	0,74
	Японский	0,57
	Данные	0,55
	Автопроизводитель	0,55
	Марка	0,55
	Легковой	0,54
	Единица	0,53
	Модель	0,52
	Автодилер	0,52
	Авторынок	0,51
	Реализация	0,51
Автостат	0,50	
Бренд	0,50	

Как видно из табл. 4, 5, путем аппроксимации исходной разреженной матрицы «термины-на-документы» матрицей меньшего ранга мы сумели избавиться от информационного шума и усилить существенные связи между терминами и документами. Затем с помощью косинусной меры мы рассчитали попарную близость между терминами, представленными векторами-строками в новой матрице. Фрагмент матрицы попарной близости представлен в табл. 6.

Из полученной матрицы мы отобрали все пары, близость между которыми превосходила значение 0,5. Выделенные пары мы объединили в семантические кластеры. В табл. 7–11 представлены несколько таких кластеров.

Таблица 8. Семантический кластер слов «Авария», «ДТП»

Первый термин в паре	Второй термин в паре	Близость
Авария	ДТП	0,8
	Погибнуть	0,66
	Произойти	0,64
	Человек	0,6
	Столкнуться	0,56
	Пострадать	0,53
ДТП	Авария	0,8
	Погибнуть	0,72
	Человек	0,64
	Произойти	0,62
	Погибший	0,58
	Водитель	0,55
	Вина	0,54
	Пострадать	0,54
	Авткатастрофа	0,53
	Происшествие	0,53
	Неосторожность	0,53
	Столкнуться	0,53
	Повлечь	0,52

Таблица 9. Семантический кластер слова «Шоссе»

Первый термин в паре	Второй термин в паре	Близость
ШОССЕ	Каширский	0,74
	Волоколамский	0,71
	Ленинградский	0,68
	Дмитровский	0,64
	Улица	0,62
	Проспект	0,59
	Эшелон	0,57
	МКАД	0,56
	Можайский	0,56
	Движение	0,53
	Геолойф	0,51

Полученный тезаурус мы использовали для классификации 100 сообщений, опубликованных на форумах автолюбителей. 50 постов – относились к категории «Дорожное движение», 50 постов к категории «Разное». Как было отмечено, в качестве метода классификации мы использовали метод

Роккио с радиусом класса 0,002. Количество ложных пропусков составило 5 документов. Количество ложных обнаружений составило 6 документов. Таким образом, процент ошибок первого рода составил 10 %, процент ошибок второго рода – 12 %.

Таблица 10. Семантический кластер слов «Талон», «Техосмотр», «ОСАГО»

Первый термин в паре	Второй термин в паре	Близость
Талон	Техосмотр	0,91
	Автостраховщик	0,89
	Осмотр	0,78
	Прохождение	0,68
	РС	0,66
	ОСАГО	0,56
Техосмотр	Талон	0,91
	Автостраховщик	0,87
	Прохождение	0,75
ОСАГО	Полис	0,95
	Автостраховщик	0,62

Заключение

Авторы работы исследовали возможность автоматического построения тезауруса для заданной предметной области на основе статистических методов обработки текстов на естественном языке (Хи-квадрат и латентный семантический анализ). Несмотря на то, что обучающая коллекция документов была не слишком большой по размеру, сформированный тезаурус достаточно хорошо соотносится с выбранной предметной областью, что подтверждается проведенным экспериментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров В.В., Грановский Д.В. Вероятностная модель токенизации в проекте Открытый корпус // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы 15-го научно-практ. семинара. МГИ электроники и математики. – М., 2012. – С. 176–183.
2. Губин М.В., Морозов А.Б. Влияние морфологического анализа на качество информационного поиска // RCDL 2006: Труды 8-й Всеросс. научной конф. – Суздаль, 17–19 октября 2006. – Суздаль, 2006. – С. 224–228.
3. Автоматическая Обработка Текста. Исходники словарей и программ // АОТ.ру. 2012. URL: <http://aot.ru/download.php> (дата обращения: 12.09.2012).
4. Большакова Е.И. и др. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная лингвистика. – М.: МИЭМ, 2011. – 272 с.
5. Седова Я.А., Квятковская И.Ю. Системный анализ корпуса текстов научного знания // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 4. – № 2. – С. 196–203.

Таблица 11. Семантический кластер слов «Права», «Инспектор», «Статья»

Первый термин в паре	Второй термин в паре	Близость
Права	Лишить	0,77
	Лишение	0,75
	Водительский	0,59
	КОАП	0,53
	Водитель	0,52
	Арест	0,51
Инспектор	ДПС	0,64
	Гаишник	0,60
	Патрульный	0,52
Статья	УК	0,87
	Свобода	0,72
	Повлечь	0,65
	Преступление	0,64
	Неосторожность	0,63
	РФ	0,63
	Возбудить	0,61
	Уголовный	0,61
	Совершить	0,59
	Совершение	0,58
	Грозить	0,55

В дальнейших работах планируется классифицировать семантические связи, выявленные между терминами тезауруса, с помощью применения лексико-грамматических шаблонов. По нашему мнению, это позволит выделить в составе тезауруса отдельные разделы, описывающие имена собственные, синонимы, ассоциации, действия и т. д.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (соглашение № 14.В37.21.0406).

6. Тыртышников Е.Е. Методы численного анализа. – М.: ИЦ Академия, 2007. – 317 с.
7. Плешко В.В., Поляков П.Ю. RCO на РОМИП 2008 // РОМИП 2008: Труды Российского семинара по Оценке Методов Информационного Поиска 2007–2008. – Дубна, 9 октября 2008. – Санкт-Петербург: НУ ЦСИ, 2008. – С. 96–107.
8. Максаков А.В. Сравнительный анализ алгоритмов классификации и способов представления Web-документов // РОМИП 2005: Труды III Российского семинара по Оценке Методов Информационного Поиска. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 63–73.
9. Вежнев В. Оценка качества работы классификаторов // Компьютерная графика и мультимедиа. Сетевой журнал. 2007. URL: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/106> (дата обращения: 12.09.2012).
10. Gazeta.Ru – Главные новости дня // gazeta.ru. 1999. URL: <http://www.gazeta.ru/> (дата обращения: 10.09.2012).

Поступила 18.09.2012 г.

ГЕНЕРАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПОДДЕРЖКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА

А.В. Кизим, А.Д. Кравец, А.Г. Кравец

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

E-mail: kizim@mail.ru

Рассматривается процесс разработки модели генерации интеллектуальных мультиагентных систем. Идея универсального генератора агентов отражает потребность разработчиков в оптимизации и ускорении процесса разработки и изменения систем, основанных на модели взаимодействующих интеллектуальных агентов. Генератор позволяет использовать широкий спектр интеллектуальных методов для создания агентов мультиагентных систем. Производится апробация системы генерации мультиагентных систем на задачах поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования.

Ключевые слова:

Мультиагентные системы, интеллектуальные методы, генерация агентов, техническое обслуживание, ремонт, автоматизация.

Key words:

Multi-agent systems, intellectual methods, agent generation, maintenance, repair, automation.

Для мониторинга, организации взаимодействия и упрощения процесса управления объектами схожей структуры используются агенты, объединяемые в мультиагентную систему (МАС). Модель МАС, изначально разработанная для представления процессов взаимодействия набора объектов схожей структуры, успешно применяется во множестве научных отраслей [1–8]. Использование этой модели в сферах робототехники и интеллектуального анализа данных привело к выработке концепта агента, как объекта, наделенного правами пользователя и способного к совершению схожего спектра задач. Таким образом, агент является сложной системой, которая может быть основана на интеллектуальных методах, внутри системы мультиагентного взаимодействия.

В то же время нарастающая сложность как самих агентов, так и мультиагентных систем требует разработки методики ускорения и оптимизации разработки мультиагентных систем. Достижение этой цели возможно при помощи модели процесса разработки/генерации МАС.

При решении задачи разработки модели генерации агентов была поставлена и выполнена подзадача проведения анализа существующего на данный момент процесса проектирования мультиагентных систем и создания модели процесса разработки мультиагентной системы, приведенной на рис. 1.

На данный момент процесс разработки проекта мультиагентной системы требует безостановочного взаимодействия разработчика и эксперта, хотя некоторые жизненно важные для всего проекта шаги могут выполняться без привлечения эксперта [9]. Примером такого шага может являться шаг выбора средства разработки, который критически влияет на структуру будущей системы и на процесс проектирования в целом. К тому же многие мультиагентные системы избегают сложной структуры агентов, использующей интеллектуальные методы и поведенческие алгоритмы, так как вопрос их реализации решается разработчиком.

На основе проведенного анализа был выработан концепт создаваемой модели генерации МАС [3], включающий в себя ряд требований, а именно:

- предоставить эксперту возможность выбора структуры агентов и системы их взаимодействия согласно его представлению о предметной области;
- обеспечить возможность разработки агентов, основанных на интеллектуальных методах, что позволит системе адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования;
- выполнять генерацию агентов на основе подготовленного набора интеллектуальных методов при непосредственном участии эксперта.

Использование интеллектуальных методов позволит не только сделать систему более гибкой, но также наиболее полно отразит идею передачи прав, что делает систему генерации универсальной.

Руководствуясь выработанным концептом, была разработана модель генерации мультиагентных систем, базовая часть которой приведена на рис. 2.

Согласно этой модели, роль разработчика сводится к приложению, которое может быть использовано экспертом для задачи требуемых настроек создаваемой мультиагентной системы.

Программная система генерации МАС состоит из двух основных блоков, необходимых для создания мультиагентной системы: банка интеллектуальных методов и генератора кода агентов.

Банк интеллектуальных агентов состоит из предварительно разработанных интеллектуальных методов, которые могут применяться в структуре агентов. Банк включает в себя методы различных направлений, таких как поведенческие алгоритмы, распознавание образов, интеллектуальный анализ информации, прогнозирование и другие.

В распоряжении генератора агентов находится ряд структур агентов и систем их взаимодействия [10]. Основываясь на выбранных интеллектуальных методах, а также ключевых выборках и настройках, отражающих представление эксперта о

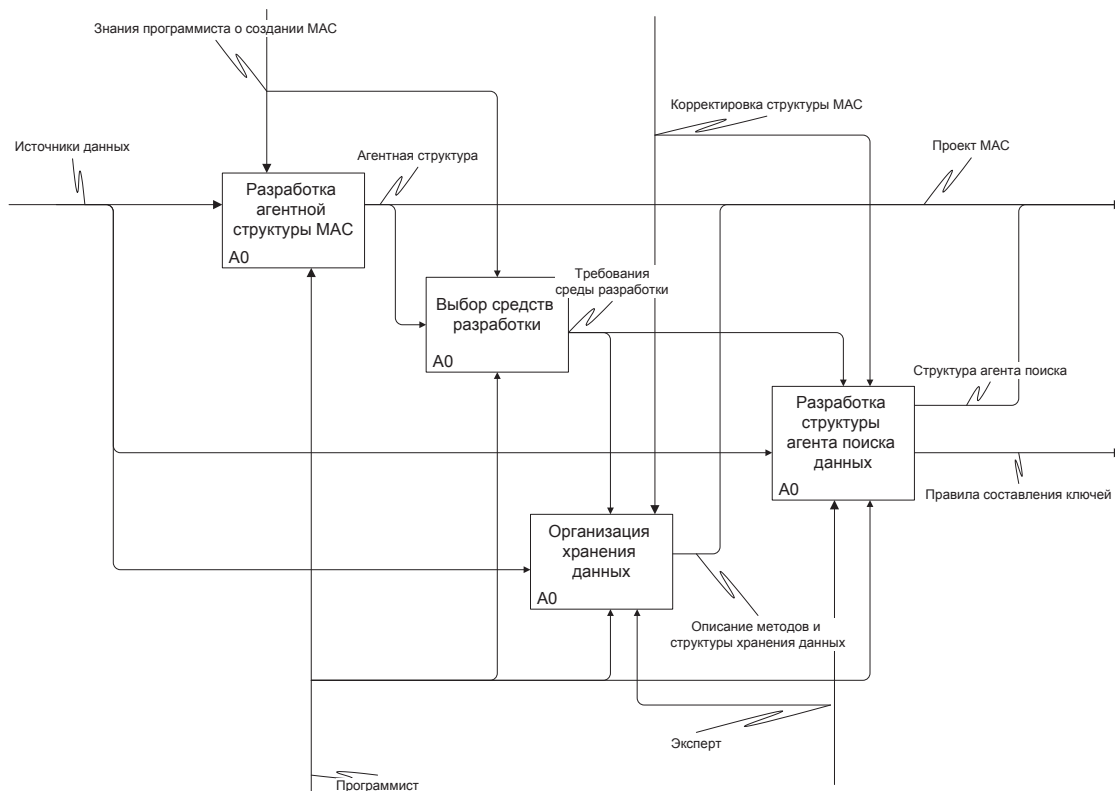


Рис. 1. Модель IDEF0 «As-Is» процесса разработки мультиагентной системы

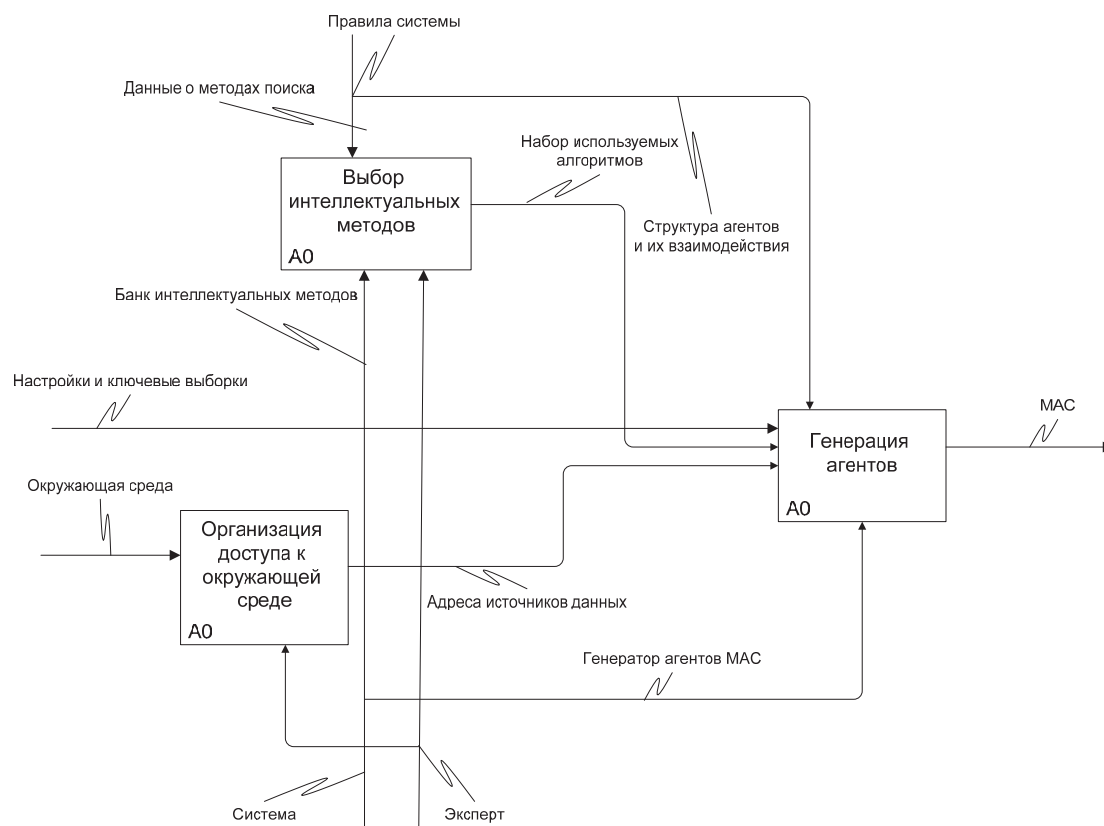


Рис. 2. Модель IDEF0 «To-Be» генерации мультиагентной системы

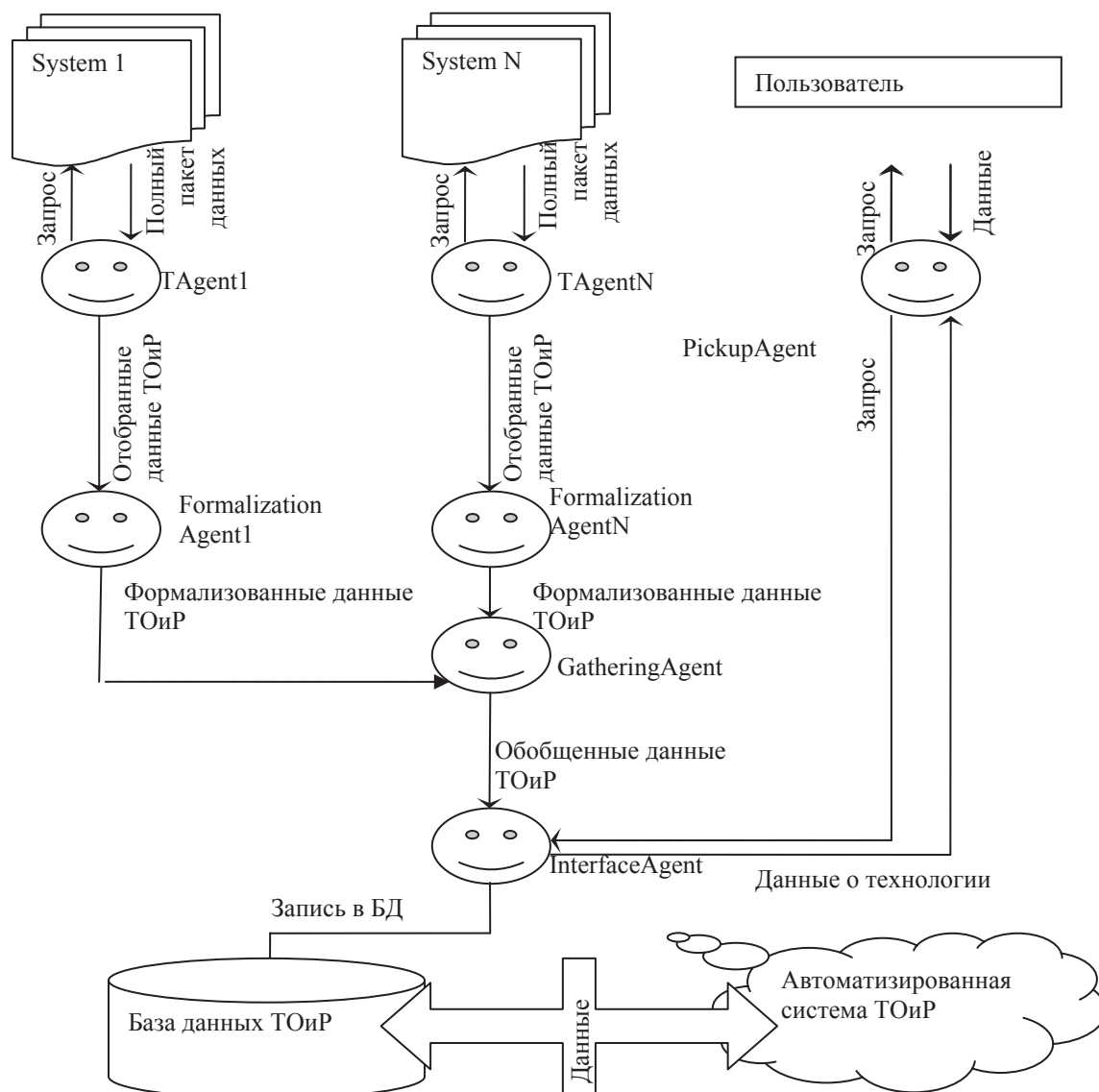


Рис. 3. Взаимодействие агентов в системе

поведении MAC в среде, генератор создает код системы, реализуя поставленные перед системой задачи.

Апробация системы генерации MAC производится на базе ряда задач поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования (ТОиР). Обоснованность применения MAC для задач управления ТОиР подтверждается в работе [11]. Постановка самих задач поддержки и автоматизации процессов технического обслуживания и ремонта оборудования выполнена в работах [12–14]. Агентные технологии применяются к таким функциональным задачам ТОиР, как:

- сбор информации о состоянии (мониторинг функционирования) оборудования [8];
- обеспечение управления документацией [6–7];
- сбор информации о деятельности ремонтных подразделений;
- оценка эффективности процесса ТОиР;

- управление процессом выполнения ТОиР [14] и другим.

С помощью системы генерации MAC для конкретных задач из банка агентов могут быть выбраны структуры и методы агентов, наиболее характерные для задачи.

Решаются задачи построения и использования MAC (в т. ч. имитационного моделирования процессов ТОиР) для сервисного ремонтного предприятия, осуществляющего аутсорсинговые услуги по ТОиР оборудования производств-заказчиков различных отраслей.

Применительно к этой задаче сгенерированный многоагентный модуль сбора данных и извлечения знаний (Data Mining) включает в себя следующих агентов (рис. 3):

- TAgent {1..N} – агент-сборщик, настроенный на определенную исходную систему (автоматизированные системы, датчики). Принимает

полный пакет данных исходной системы и отбирает только те из них, которые соответствуют критерию ТОиР (с помощью интегрированных в агент методов интеллектуального анализа информации).

- FormalizationAgent {1..N} – агент, настроенный на определенную внешнюю систему, занимающийся приведением отобранных данных к унифицированному виду.
- GatheringAgent – обобщает полученные данные.
- InterfaceAgent – организует взаимодействие пользовательских данных.
- PickupAgent – задает общие методы и данные для всех сборщиков.

Таким образом, отобранные интеллектуальные методы встраиваются в код мультиагентной системы, реализуя поставленные перед системой задачи и решая функциональные задачи комплекса систем программно-информационной поддержки ТОиР. Первичная реализация включает интеллектуальные методы сбора и анализа данных. В даль-

нейшем планируется реализация методов управления процессом ТОиР.

Выводы

Показано, что применение системы генерации многоагентных систем, основанных на модели взаимодействующих интеллектуальных агентов, позволяет автоматизировать процессы разработки и изменения МАС, избежать ряда проблем и сократить временные затраты. Предложенная система генерации МАС (состоящей из банка интеллектуальных методов и генератора кода агентов) основана на полученных моделях процесса разработки и генерации мультиагентных систем. Генератор позволяет использовать широкий спектр интеллектуальных методов для создания агентов мультиагентных систем. Апробация системы генерации МАС производится на задачах поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования. В первую очередь реализованы интеллектуальные методы сбора и анализа информации по ТОиР, которые позволяют осуществлять накопление информации и знаний для их последующего использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов В.Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусств, интеллекта. – 1998. – № 2. – С. 5–63.
2. Устюжанин А.Е. Многоагентные интеллектуальные системы. 2007. URL: <http://www.microsoft.com/Rus/Msdnaa/Curricula/default.aspx> (дата обращения: 24.09.2012).
3. Кравец А.Д., Фоменков С.А., Кравец А.Г. Разработка модели генерации интеллектуальных агентов // Наименование конференции: Сборник научных трудов Sworld по материалам Международ. научно-практ. конф. – 2012. – Т. 5. – № 3. – С. 59–61.
4. Нгуен Д.Х., Кизим А.В., Камаев В.А. Проектирование системы удостоверяющих центров на основе мультиагентов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – Вып. 3. – С. 210–212.
5. Хынг Н.Д., Камаев В.А., Кизим А.В. Организация удостоверяющих центров на основе мультиагента. – Саарбрюккен: Lambert Academic publishing, 2011. – 165 с.
6. Нгуен Д.Х., Камаев В.А., Кизим А.В. Моделирование обслуживания движения документов с использованием мультиагентных технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 5. – С. 245–248.
7. Нгуен Д.Х., Камаев В.А., Кизим А.В., Быков Д.В. Организация системы документооборота на основе мультиагента // Безопасность информационных технологий. – 2012. – № 1. – С. 130–132.
8. Камаев В.А., Лежебоков В.В. Разработка и применение модели автоматизированной системы управления информационными процессами к задаче мониторинга состояния оборудования // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 9. – С. 18–22.
9. Яровенко В.А., Фоменков С.А. Freeagent-платформа для разработки мультиагентных систем // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – Т. 4. – № 13. – С. 164–166.
10. Антоненко А.С., Кравец А.Г., Заворотнов Е.А. Мультиагентный модуль сбора вакансий с порталов региональных кадровых агентств в рамках интеллектуальной среды «Кадровый резерв» // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2007. – № 2. – С. 38–42.
11. Сергушичева М.А., Швецов А.Н. Архитектура мультиагентной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования на распределенном предприятии // Интеллектуальные системы: Труды IX Междунар. симпозиума / под ред. К.А. Пупкова. – М.: РУСАКИ, 2010. – С. 624–628.
12. Кизим А.В. Постановка и решение задач автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – Т. 2. – С. 131–135.
13. Кизим А.В. Обоснование необходимости автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2009. – Т. 6. – № 6. – С. 118–121.
14. Кизим А.В. Задачи и методы поддержки ТОиР оборудования на протяжении его жизненного цикла // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – Т. 4. – № 13. – С. 55–59.

Поступила 26.09.2012 г.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Л.В. Массель, А.Г. Массель

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
E-mail: massel@isem.sei.irk.ru; amassel@gmail.com

Рассматривается применение интеллектуальных вычислений для поддержки принятия решений в исследованиях направлений развития топливно-энергетического комплекса страны с учетом требований энергетической безопасности. В первую очередь к ним относятся вычисления, основанные на онтологическом, когнитивном и событийном моделировании. В последнее время интеллектуальные вычисления расширены применением байесовских сетей доверия для оценки рисков чрезвычайных ситуаций в энергетике и декларативных представлений процессов преобразования данных. Реализована интеллектуальная ИТ-среда, интегрирующая инструментальные средства интеллектуальных вычислений и обеспечивающая поддержку предлагаемой двухуровневой технологии исследований.

Ключевые слова:

Интеллектуальные вычисления, онтологическое, когнитивное и событийное моделирование, интеллектуальная ИТ-среда.

Key words:

Intelligent computing, ontology, cognitive and event modeling, intelligent IT-environment.

Введение

В системных исследованиях энергетики, которые выполняются в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (г. Иркутск), выделяют исследования направлений развития как топливно-энергетического комплекса страны, так и отраслевых систем энергетики, и исследования функционирования этих систем. К первому направлению относятся исследования направлений развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны с учетом требований энергетической безопасности, для поддержки которых выполнена предлагаемая работа.

Традиционно эти исследования выполнялись с привлечением разных версий больших программных комплексов, основанных на решении общей задачи линейного программирования, использующих экономико-математические модели ТЭК страны большой размерности, включающие несколько сотен уравнений и десятки тысяч переменных. Исследования носят многовариантный характер, причем многовариантность существенно возрастает в связи с необходимостью учета требований энергетической безопасности: на базовые варианты накладываются сценарии возможных чрезвычайных ситуаций (ЧС), а также превентивных (предупреждающих возникновение ЧС), оперативных (выполняемых во время ЧС) и ликвидационных (устраняющих последствия ЧС) мероприятий.

Энергетическая безопасность (ЭБ) не является синонимом технической безопасности и рассматривается как составляющая национальной безопасности, в части защищенности граждан, общества, государства, экономики от угроз дефицита в обеспечении их обоснованных потребностей топливно-энергетическими ресурсами приемлемого качества в различных условиях.

В последние годы в исследованиях был принят комбинаторный подход, что приводило к получе-

нию 5–10 млн вариантов, из них экспертами выделялся «коридор» наиболее вероятных вариантов, далее выполнялся более детальный анализ этих вариантов. Несмотря на уменьшение количества анализируемых вариантов, нагрузка на экспертов очень высока, и требуются большие затраты времени для анализа вариантов и формирования требуемых рекомендаций.

Авторами была предложена двухуровневая информационная технология исследований, в которой на первом уровне выполняется качественный анализ с использованием интеллектуальных вычислений, а именно: онтологического, когнитивного и событийного моделирования [1, 2]. На основе результатов качественного анализа выбираются варианты развития ТЭК, которые необходимо рассчитать более детально. Эти варианты рассчитываются на втором уровне с использованием многоагентного программного комплекса (ПК) ИНТЭК-М для исследований направлений развития ТЭК с учетом требований ЭБ [3].

Интеллектуальные вычисления

Под интеллектуальными вычислениями (Intelligent Computing) понимаются методы и системы искусственного интеллекта, направленные на усиление и поддержку естественного интеллекта (поддержку принятия решений экспертами). Интеллектуальная инструментальная среда (интеллектуальная ИТ-среда) — это совокупность инструментальных средств (интеллектуальных систем и баз знаний, программных комплексов и баз данных), совместное использование которых для решения поставленной задачи осуществляется с помощью экспертов и/или интеллектуальных вычислений.

К интеллектуальным вычислениям в данной работе относятся, в первую очередь, вычисления, основанные на онтологическом, когнитивном и событийном моделировании.

Онтологии были предложены Т. Грубером (Т. Gruber) для декларативного представления знаний и определяются в общем виде как база знаний специального вида или как «спецификация концептуализации» предметной области. Это означает, что в предметной области на основе классификации базовых терминов выделяются основные понятия (концепты), и устанавливаются связи между ними (концептуализация). Затем онтология может быть представлена в графическом виде или описана на одном из формальных языков (формальная онтология) – это процесс спецификации онтологий. Вопросы онтологического моделирования рассматривались в работах Т. Грубера (Gruber Т.), Н. Гуарино (Guarino N.) и др., в нашей стране – Тавриловой Т.А., Загоруйко Ю.А., Калининско Л.А., Коголовского М.Р., Серебрякова В.А., Тузовского В.Ф., Хорошевского В.Ф., Ямпольского В.З. и др., а также в работах авторов и их коллег: Ворожцовой Т.Н., Скрипкина С.К., Копайгородского А.Н., Макагоновой Н.Н.

Под когнитивным моделированием понимается построение когнитивных моделей или, иначе, когнитивных карт (ориентированных графов), в которых вершины соответствуют факторам (концептам), а дуги – связям между факторами (положительным или отрицательным), в зависимости от характера причинно-следственного отношения. Математическим аппаратом для построения когнитивных моделей является теория графов.

Основы когнитивного моделирования были разработаны в свое время Ван Хао (1956 г.), Р. Аксельродом (1976 г.), Д.А. Поспеловым (1981 г.). Это направление получило свое развитие в работах Э.А. Трахтенгерца [4] и, в частности, активно развивается в Институте проблем управления РАН (Абрамова Н.А., Кульба В.В., Кулинич А.А., Максимов В.И. и др.) для анализа влияний при управлении слабоструктурированными ситуациями.

Вопросы когнитивного моделирования в энергетике рассматривались в работах авторов [5, 6]. В исследованиях проблем ЭБ когнитивное моделирование используется для ситуационного анализа проблемы ЭБ и моделирования угроз ЭБ, под которыми понимаются неблагоприятные для энергетике события. Реализованы инструментальные средства поддержки когнитивного моделирования – библиотека CogMap.

Под событийным моделированием понимается построение поведенческих моделей, причем в качестве объектов моделирования могут рассматриваться как люди, так и технические объекты. Сущность событийного метода моделирования заключается в отслеживании на модели последовательности событий в том же порядке, в каком они происходили бы в реальной системе. Задаваемые моделью последовательности реализаций событий – цепочки событий – описывают сценарии реакции системы на возникновение инициирующего события, стоящего в начале цепочки.

В качестве инструмента событийного моделирования используется аппарат Joiner-сетей (JN) – одной из разновидностей алгебраических сетей, предложенной Л.Н. Столяровым [7, 8]. Joiner-сети можно рассматривать как расширение сетей Петри, ориентированное на построение поведенческих моделей. В основе теории JN лежит описание логики взаимодействия асинхронных процессов в виде набора пусковых и флаговых функций, состоящих из булевых функций. Особенностью JN является то, что они предусматривают как графическое представление, так и описание в виде логических формул, обработку которых можно автоматизировать. Событийное моделирование в энергетике развивается авторами совместно с В.Л. Аршинским [6, 9]. Реализованы инструментальные средства поддержки когнитивного моделирования – библиотека EventMap.

В последнее время интеллектуальные вычисления расширены применением байесовских сетей доверия для оценки рисков чрезвычайных ситуаций [10] и средствами декларативных представлений процессов преобразования данных, обеспечивающих автоматизацию перехода от качественного к количественному анализу [11].

Интеллектуальная ИТ-среда и двухуровневая информационная технология исследований

Предложена концепция интеллектуальной ИТ-среды, поддерживающей двухуровневую технологию исследований направлений развития ТЭК с учетом требований ЭБ [12]. Интеллектуальная ИТ-среда определяется как $V_{IT} = \{O, E, M_C, M_S\} \cup T_V$, где $\{O\}$ – множество онтологий; $\{E\}$ – множество описаний прецедентов чрезвычайных ситуаций; $\{M_C\}$ – множество когнитивных моделей; $\{M_S\}$ – множество событийных моделей; T_V – инструментальные средства поддержки ИТ-среды, включающие описание знаний, представленных в виде онтологий, описаний прецедентов ЧС, когнитивных и событийных моделей и средства оперирования ими.

Таким образом, интеллектуальная ИТ-среда включает пространство знаний, интегрирующее: онтологические модели знаний в области исследований ЭБ, базу знаний о прецедентах ЧС в энергетике и базы знаний, содержащие когнитивные модели стратегических угроз ЭБ и событийные модели развития и последствий ЧС в энергетике (рис. 1), а также инструментальные средства описания знаний и оперирования ими (рис. 2).

Библиотеки OntoMap, CogMap и EventMap реализованы на основе среды графического моделирования GrModeling [13], разработанной в лаборатории информационных технологий в энергетике ИСЭМ СО РАН, возглавляемой Л.В. Массель. Экспертная система «Emergencsu» разработана под руководством А.Г. Масселя, в настоящее время ее база знаний содержит описания более 600 чрезвычайных ситуаций в энергетике России за последние 30 лет [14].

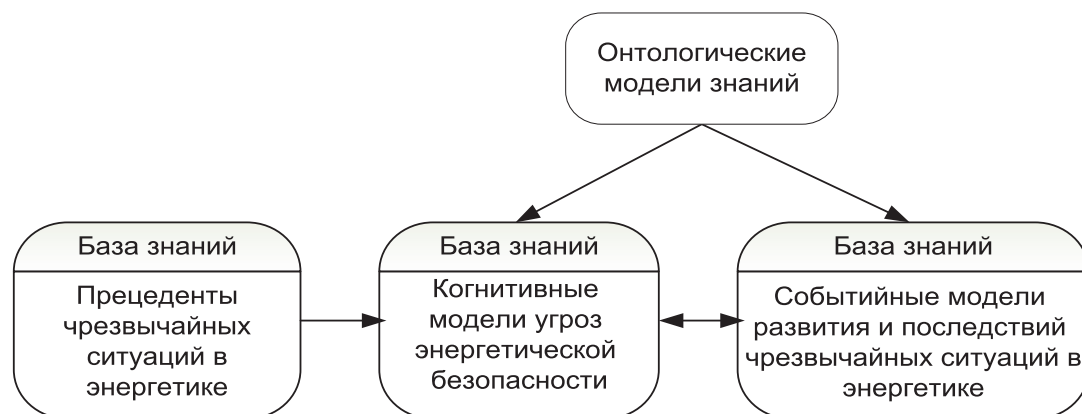


Рис. 1. Пространство знаний, поддерживаемое интеллектуальной ИТ-средой

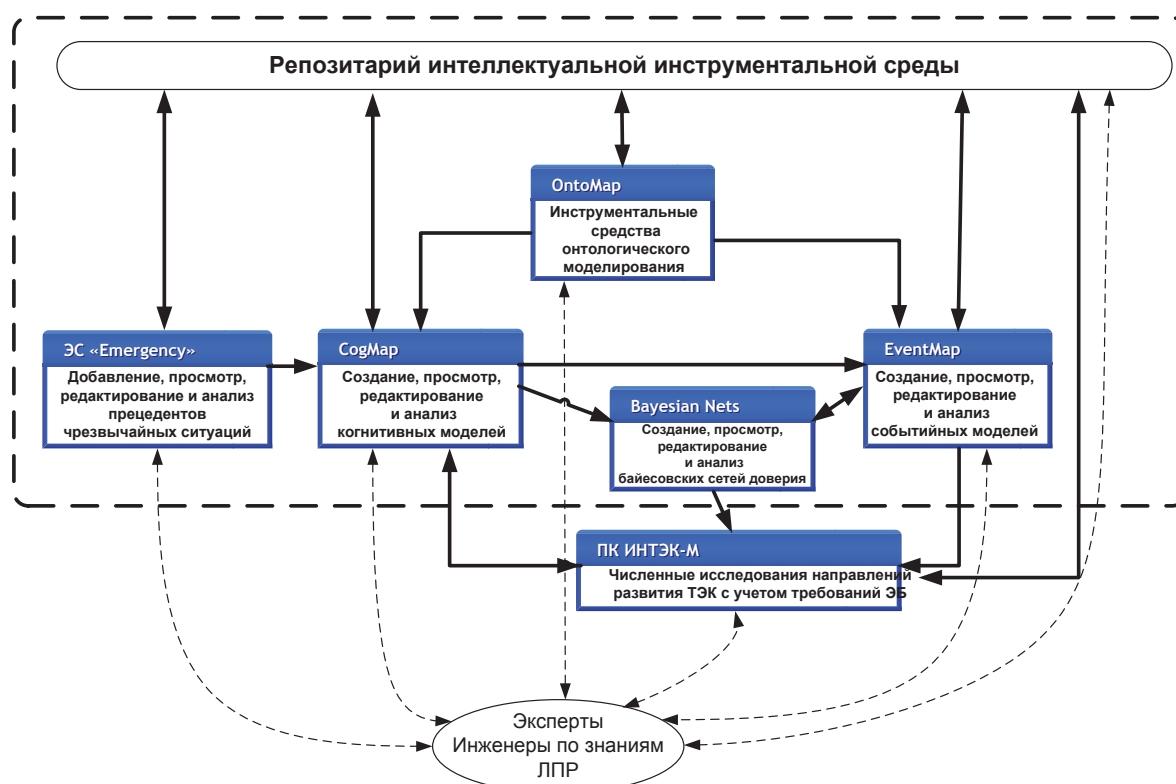


Рис. 2. Взаимосвязь инструментальных средств интеллектуальной ИТ-среды

Примеры когнитивных и событийных моделей, построенных с помощью библиотек CogMap и EventMap, приведены на рис. 3 и 4. На рис. 3 приведена когнитивная модель угрозы типа «Авария, взрыв, пожар» (АВП). Имеется возможность отображения основных концептов, самой угрозы и управляющих воздействий (превентивных, оперативных и/или ликвидационных мероприятий). Положительные или отрицательные причинно-следственные связи показаны знаками «+» или «-». Может быть введено более подробное описание угрозы.

Логические уравнения, описывающие передачу возбуждений в Joiner-сети, представленной на рис. 4, приведены в таблице; Joiner-сеть, соответ-

ствующая событийной карте, показанной на рис. 4, представлена на рис. 5.

Таблица. Логические уравнения, описывающие передачу возбуждений в Joiner-сети, представленной на рис. 4 (верхняя часть фрагмента)

Пусковые функции	Флаговые функции
$\psi_1(t+1) = \varphi_0(t) \cdot \overline{\varphi_1(t)}$	$\varphi_0(t+1) = 0; \varphi_1(t+1) = 1;$
$\psi_2(t+1) = \varphi_1(t) \cdot \overline{\varphi_2(t)}$	$\varphi_1(t+1) = 0; \varphi_2(t+1) = 1;$
$\psi_3(t+1) = \varphi_0(t) \cdot \overline{\varphi_3(t)} \cdot \overline{\varphi_4(t)}$	$\varphi_1(t+1) = 0; \varphi_3(t+1) = 1; \varphi_4(t+1) = 1;$
$\psi_4(t+1) = \varphi_3(t) \cdot \overline{\varphi_5(t)}$	$\varphi_3(t+1) = 0; \varphi_5(t+1) = 1;$
$\psi_5(t+1) = \varphi_4(t) \cdot \overline{\varphi_6(t)}$	$\varphi_4(t+1) = 0; \varphi_6(t+1) = 1;$

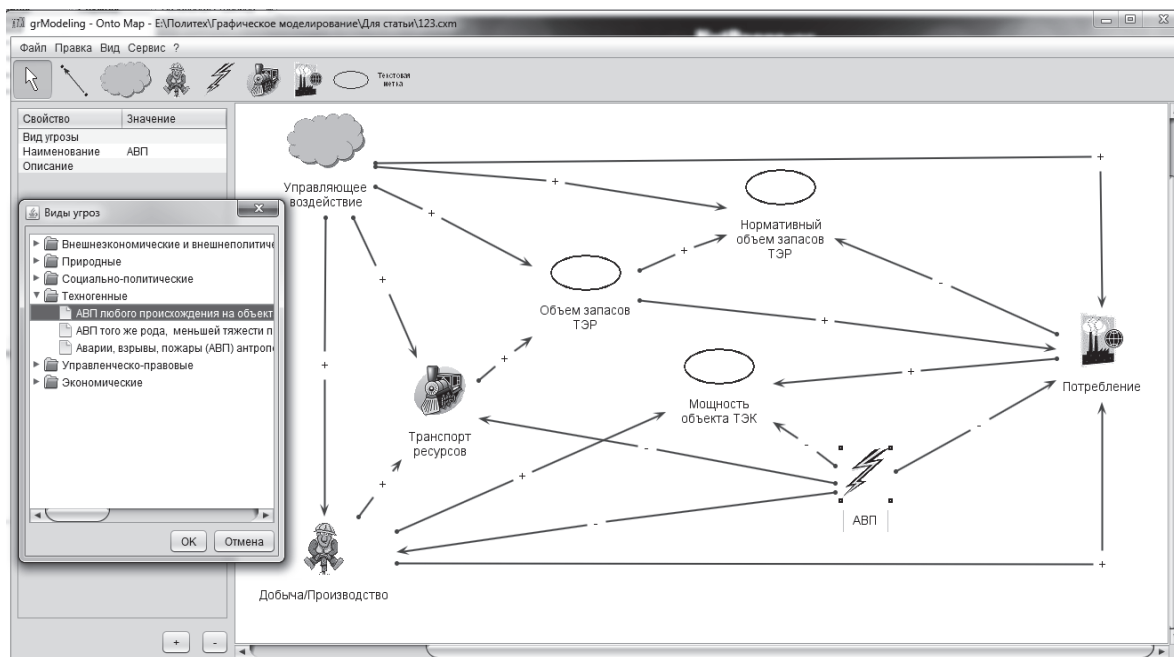


Рис. 3. Пример когнитивной модели угрозы «Авария, взрыв, пожар», построенной средствами библиотеки CogMap

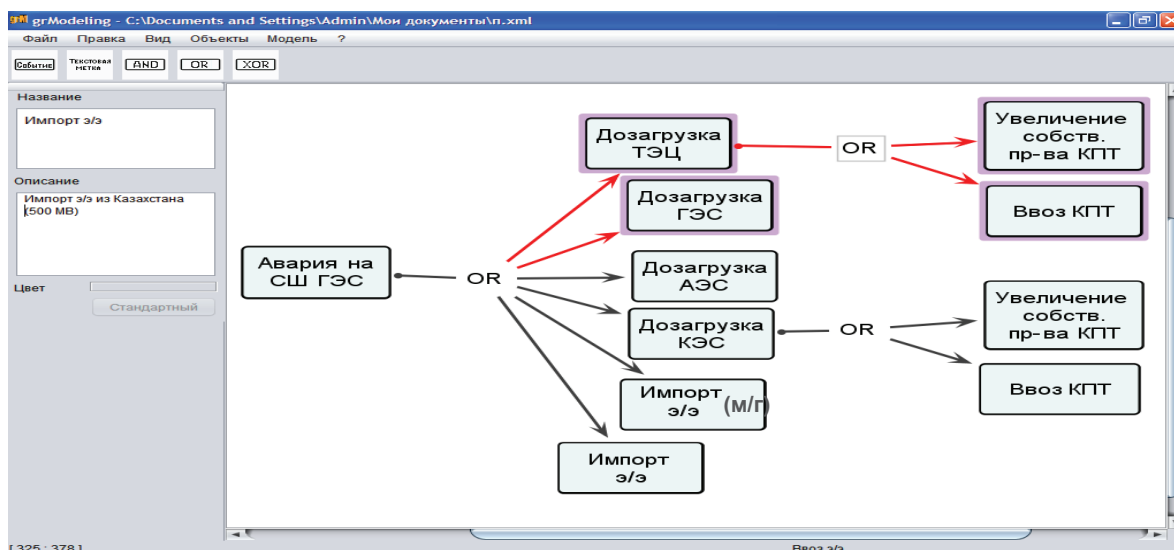


Рис. 4. Пример фрагмента событийной модели последствий ЧС на Саяно-Шушенской ГЭС, построенной средствами библиотеки EventMap

На рис. 6 приведена схема двухуровневой технологии интеллектуальной поддержки принятия решений в исследованиях направлений развития ТЭК с учетом требований ЭБ, поддерживаемая интеллектуальной ИТ-средой (рис. 2).

Заключение

В статье рассмотрено применение интеллектуальных вычислений для поддержки принятия решений в исследованиях направлений развития топливно-энергетического комплекса страны с учетом требований энергетической безопасности. В первую очередь к ним отнесены вычисления, ос-

нованные на онтологическом, когнитивном и событийном моделировании. В последнее время интеллектуальные вычисления расширены применением байесовских сетей доверия для оценки рисков чрезвычайных ситуаций в энергетике и декларативных представлений процессов преобразования данных в вычислительном эксперименте. Реализована интеллектуальная ИТ-среда, интегрирующая инструментальные средства интеллектуальных вычислений и обеспечивающая поддержку предлагаемой двухуровневой технологии исследований, включающей этапы качественного анализа с использованием интеллектуальных вычислений

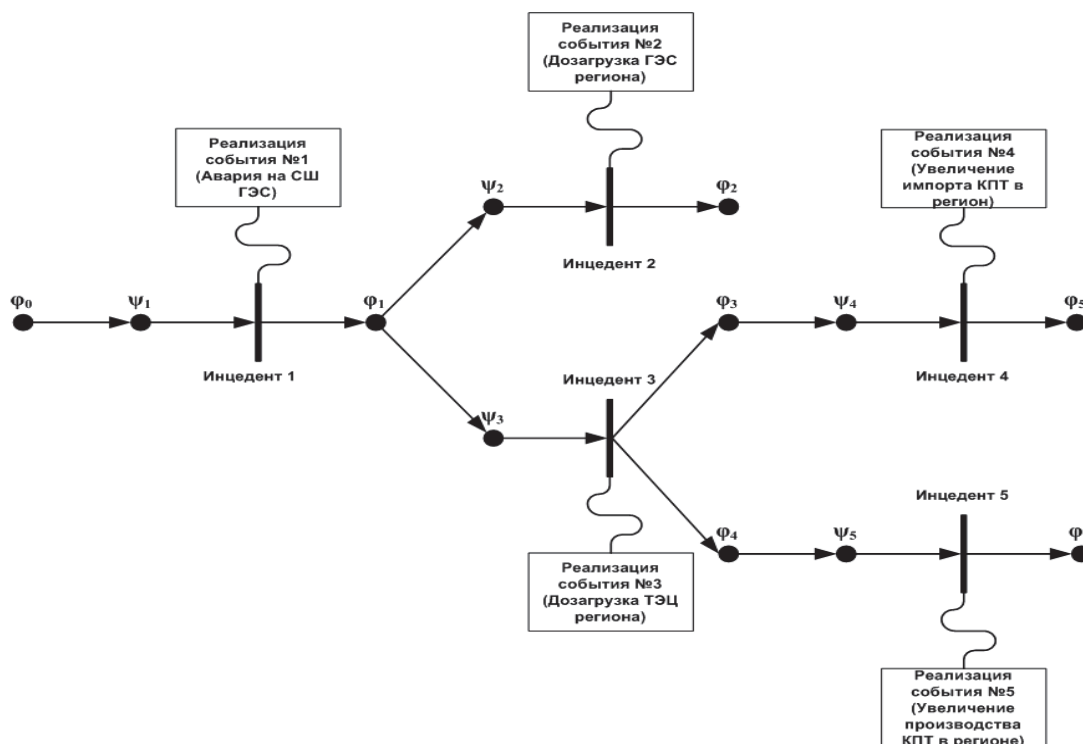
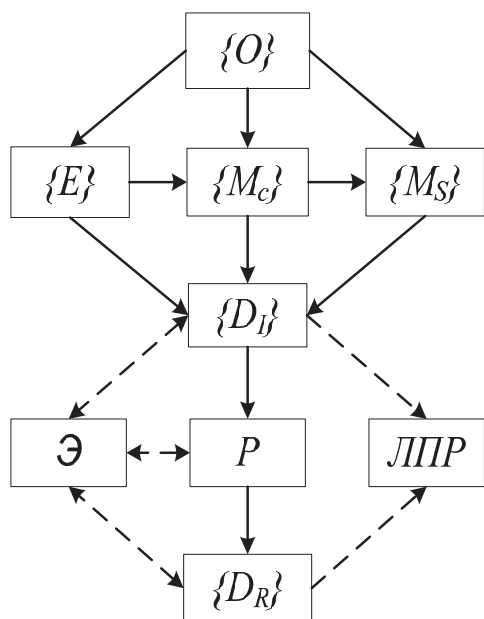


Рис. 5. Joiner-сеть для событийной модели, представленной на рис. 4 и описанной в таблице



- $\{O\}$ – множество онтологий;
- $\{M_C\}$ – множество когнитивных моделей;
- $\{M_S\}$ – множество событийных моделей;
- $\{E\}$ – множество описаний прецедентов ЧС;
- $\{D_I\}$ – информация для поддержки принятия решения при выборе стратегии проведения вычислительного эксперимента;
- $\{D_R\}$ – информация для принятия решений (формировании рекомендаций);
- P – программный комплекс для проведения вычислительных экспериментов (обоснования вариантов развития ТЭК с учетом требований ЭБ). На первом этапе это ПК «ИНТЭК-М»;
- \mathcal{E} – эксперт-исследователь;
- $ЛПР$ – лицо, принимающее решение

Рис. 6. Схема двухуровневой технологии интеллектуальной поддержки принятия решений в исследованиях направлений развития ТЭК с учетом требований ЭБ

и количественного анализа – численных расчетов с применением многоагентного ПК ИНТЭК-М. В настоящее время рассматриваются возможности применения интеллектуальных вычислений и реализующих их инструментальных средств как прототипов интеллектуальных компонентов при управлении режимами электроэнергетических систем

в Smart Grid – умных энергетических системах [15].

Работа выполняется при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 10–07–00264, № 11–07–00192, № 12–07–00359, а также грантов Программы Президиума РАН № 15–2012 и интеграционного проекта СО РАН и НАН Беларуси № 18.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Массель Л.В. Применение онтологического, когнитивного и событийного моделирования для анализа развития и последствий чрезвычайных ситуаций в энергетике // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2010. – № 2. – С. 34–43.
2. Массель А.Г. Методологический подход к организации интеллектуальной поддержки исследований проблемы энергетической безопасности // Информационные технологии. – 2010. – № 9. – С. 32–36.
3. Аршинский В.Л., Массель А.Г., Фартышев Д.А. Мультиагентный программный комплекс для исследований проблемы энергетической безопасности // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Труды XIV Байкальской Всеросс. конф. – Иркутск, 2009. – Т. 3. – С. 283–289.
4. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. – М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
5. Массель А.Г. Когнитивное моделирование угроз энергетической безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отд. вып. № 17. – М.: Изд-во «Горная книга», 2010. – С. 194–199.
6. Массель Л.В., Аршинский В.Л., Массель А.Г. Интеллектуальные информационные технологии поддержки принятия решений в исследованиях и обеспечении энергетической безопасности // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного эксперимента: Труды Междунар. конф. – Евпатория, 2010. – С. 192–196.
7. Столяров Л.Н., Новик К.В. Реализация параллельных процессов с помощью сетей Joiner-net // Информационные и математические технологии: Труды Байкальской Всеросс. конф. – Иркутск, 2004. – С. 11–14.
8. Столяров Л.Н. Философия событийного моделирования на примере энергетической катастрофы // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе: Труды Междунар. конф. – Украина, Гурзуф, 2010. – С. 197–200.
9. Аршинский В.Л. Событийное моделирование чрезвычайных ситуаций в энергетике // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе: Труды Междунар. конф. – Украина, Гурзуф, 2010. – С. 299–301.
10. Массель Л.В., Пяткова Е.В. Применение байесовских сетей доверия для интеллектуальной поддержки исследований проблем энергетической безопасности // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 2. – С. 8–13.
11. Массель Л.В., Курганская О.В. Автоматизация вычислительного эксперимента на основе логических моделей // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 2. – С. 8–14.
12. Массель А.Г. Интеллектуальная ИТ-среда для исследований проблемы энергетической безопасности // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе: Труды Междунар. конф. – Украина, Гурзуф, 2010. – С. 306–309.
13. Копайгородский А.Н. Проектирование и реализация системы графического моделирования // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Труды XV Байкальской Всеросс. конф. – Иркутск, 2010. – Т. 3. – С. 22–28.
14. Массель А.Г., Кузнецких В.Р., Кушнарев А.С., Пономарев И.Д., Пантелеева Л.И. Разработка экспертной системы, основанной на прецедентах чрезвычайных ситуаций в энергетике. // Винеровские чтения: Труды IV Всеросс. конф. – Иркутск, 2011. – Т. 2. – С. 154–159.
15. Массель Л.В. Проблема построения интеллектуальных и программных компонентов Smart Grid и подход к ее решению на основе агентной технологии // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе: Труды XI Междунар. конф. (Приложение к журналу «Открытое образование»). – Украина, Гурзуф, 2012. – С. 22–25.

Поступила 29.11.2012 г.

БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В. Кучуганов

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск

E-mail: Aleks_KAV@udm.ru

Предлагаются биоинспирированные алгоритмы, основанные на достижениях современной физиологии механизмов зрения, позволяющие повысить качество выделения информативных признаков на изображении и, соответственно, анализа и извлечения знаний из изображений: оператор-анализатор локальных областей, выделяющий особые и контурные точки, а также направления на соседние контурные точки; алгоритмы корреляционной оптимизации и экстраполяционного уточнения положения особых точек, динамической адаптации чувствительности и разрешающей способности локального анализатора.

Ключевые слова:

Обработка изображений, контур, особая точка, биоинспирированный алгоритм.

Key words:

Image processing, contour, singular point, bioinspired algorithms.

Существует множество программ цифровой обработки изображений [1, 2]. Их целью, как правило, является повышение качества изображения в том или ином аспекте, всевозможные манипуляции, в т. ч. ретуширование и редактирование. Одним из основных направлений обработки изображений является автоматизация решения прикладных задач, например, автоматическая векторизация чертежей, рисунков, схем. Но качество существующих векторизаторов, например: Spotlight Pro, RasterVect, Vextractor, Vectory, зачастую не удовлетворяет пользователей из-за большого количества получаемых отрезков — в среднем в 3–5 раз больше, чем при ручной обводке. Соответственно повышается объем хранимых данных, снижается качество и возможности дальнейшего использования.

Информативными признаками называют полезную для решения некоторой задачи информацию, извлеченную из исходной информации. При этом основным критерием выбора системы признаков и способов их выделения является риск потерь. Для широкого круга задач распознавания объектов и анализа их формы с целью поддержки принятия решений чаще всего используют точки, где скачкообразно меняется яркость или цвет. Из них составляются линии контуров и границ однородных областей, а на линиях — углы, пересечения и т. п.

Д. Хьюбел и Т. Визель (Нобелевская премия, 1981 г.), исследуя механизмы зрения низших позвоночных и млекопитающих, сумели выяснить логическую последовательность переработки сигналов, поступающих из сетчатки глаза, и высказали несколько предположений относительно того, какая организация коры головного мозга могла бы это обеспечить. Новый подход не только стимулировал выдвижение гипотез о механизмах, лежащих в основе зрительного восприятия, но и воодушевил тех, кто работал на других направлениях. В 1983 г. Гордон М. Шеперд выдвинул гипотезу о том, что переработка информации внутри функ-

циональных корковых единиц не является параллельной или последовательной, как предполагалось ранее, а опирается на связи, обеспечивающие оба типа обработки. Проводимые физиологами исследования дают огромный материал для гипотез и широкое поле для исследований в области совершенствования технического зрения.

На основе биоинспирированных методов для улучшения качества выделения информативных признаков на изображении *на этапе локального анализа* построены:

- оператор-анализатор локальных областей, осуществляющий анализ лучей, исходящих из центрального пикселя окрестности 3×3 или 5×5 , выбор направления смещения окрестности, выделение особых точек (конец ветви, разветвление, угол) и границ площадных объектов.
- *На этапе фрагментарного анализа:*
- корреляционная оптимизация положения особых точек (ОТ) путем рекурсивного анализа зоны артефактов — дополнение метода имитации тремора зрачка глаза примата;
- *инерционное* уточнение положения ОТ путем экстраполяции фрагментов исходящих ветвей — метод имитации «дрейфа» зрачка глаза примата;
- «захват ОТ» — скачкообразный переход в оптимизированную особую точку, как только линия входит в зону артефактов — метод имитации «саккад» зрачка глаза примата;
- повышение чувствительности локального анализатора — если в процессе трассировки контура количество исходящих ветвей из центра локального анализатора становится меньше либо равно единице, то яркостной порог динамически уменьшается до тех пор, пока не будет найдено продолжение линии (имитация механизма аккомодации хрусталика глаза примата);
- смена уровней разрешающей способности — модель аккомодации хрусталика;
- трассировка (отслеживание) линий контура и границ областей.

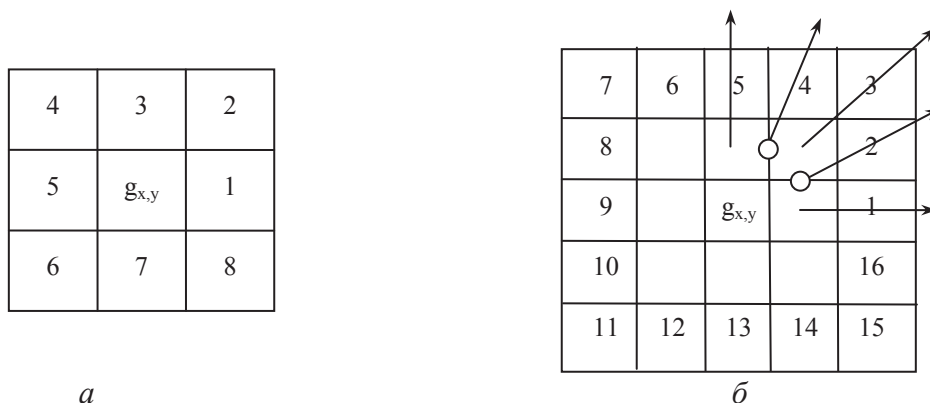


Рис. 1. Виды анализируемых окрестностей: а) 3×3; б) 5×5 и анализируемые лучи

Рассмотрим эти методы более подробно.

Для выделения локальных характеристик изображения по яркости анализируются два вида окрестностей заданного пикселя: окрестность $R1$ размером 3×3 и окрестность $R2$ размером 5×5 (рис. 1).

Анализ лучей, исходящих из центрального пикселя окрестности, заключается в следующем: чтобы в дальнейшем произвести идентификацию точки, необходимо проанализировать перепады яркостей в окрестностях $R=1$ и $R=2$ относительно выбранной центральной точки, введем дополнительное множество TB (Type beam) лучей, исходящих из пикселя $g_{x,y}$. Множество TB можно представить в следующем виде:

$$TB = \{tb_j\};$$

$$tb_j = \begin{cases} \beta(r_j^2), & \text{если } (\beta(r_{j-1}^2) - \beta(r_j^2) \geq P) \vee \\ & \vee (\beta(r_{j-1}^2) - \beta(r_j^2) < P) \wedge \\ & \wedge (tb_{j-1} \neq 255) \wedge (v(r_j^2) \leq v(r_{j-1}^2)) \vee \\ & \vee (\beta(r_{j+1}^2) - \beta(r_j^2) \geq P) \\ \text{иначе } 255, & \end{cases} \quad (1)$$

где $\beta(r_j^2)$ – яркость j -й точки в окрестности радиуса $R=2, j=1...16; P$ – исходное пороговое значение яркости, заданное пользователем.

Формулу (1) можно интерпретировать следующим образом. Если разность яркостей предыдущего и текущего лучей больше либо равна P , т. е. произошел спуск на темный луч, или если разность яркостей меньше порогового значения, но текущий луч темнее или равен по яркости предыдущему темному лучу, то пиксели находятся в яркостной «впадине». Яркость текущего луча заносится в множество TB с индексом номера луча (рис. 1). Когда текущий луч находится в яркостной впадине, он сравнивается с последующим и, если разность превышает или равна пороговому значению, он также заносится в множество TB .

Несколько соседних темных лучей составляют «темный» сектор, например, сектор, образованный лучами r_3^2, r_4^2 (рис. 2). Здесь и далее, поскольку все лучи исходят из одного центра, для краткости будем обозначать их индексом конечной точки.

Величина порога P автоматически снижается, если хотя бы одна из соседних окрестностей принадлежит контуру, но в рассматриваемом текущем пикселе продолжение контура не найдено. Необходимо отметить, что порог P – это единственный порог, задаваемый пользователем для обработки любых типов изображений, что соответствует требованию минимизации количества порогов.

Вычисление вектора контурной линии в заданной точке. Любой пиксель $g_{x,y}$ изображения G может быть отнесен либо к контурам объектов на изображении, либо к множеству фоновых точек. Если очередной пиксель имеет исходящие темные сектора, то он принадлежит множеству контурных точек.

Каждый темный сектор заменяется направлением, указывающим на следующий пиксель контурной линии. Для более точного определения вектора вычисляется «центр тяжести» сектора, состоящего из соседних темных лучей. При этом считается, что чем темнее пиксель, тем выше его вес. Направление на центр тяжести считается искомым направлением контурной линии на следующий пиксель.

Множество направлений $A=\{a_i\}$, исходящих из контурной точки, определяется следующей формулой для каждой a_i :

$$a_i = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^{16} ((255 - tb_j) \cdot \alpha(j))}{\sum_{j=1}^{16} (255 - tb_j)}, & \text{пока } tb_j \neq 255 \\ 360, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где i изменяется от 1 до 8, т. к. на окрестности R^2 не может быть более 8 независимых направлений одновременно.

Тогда количество ветвей $KW(g_{x,y})$, исходящих из точки $g_{x,y}$, равняется количеству элементов множества A .

Таким образом, любой пиксель изображения мы можем отнести либо к множеству K точек объектов, либо к фону:

$$g_{x,y} \in K, \text{ если } KW(g_{x,y}) \neq 0, K \subset G.$$

Выделение особых точек. Используя полученные данные, мы можем определить тип окрестности.

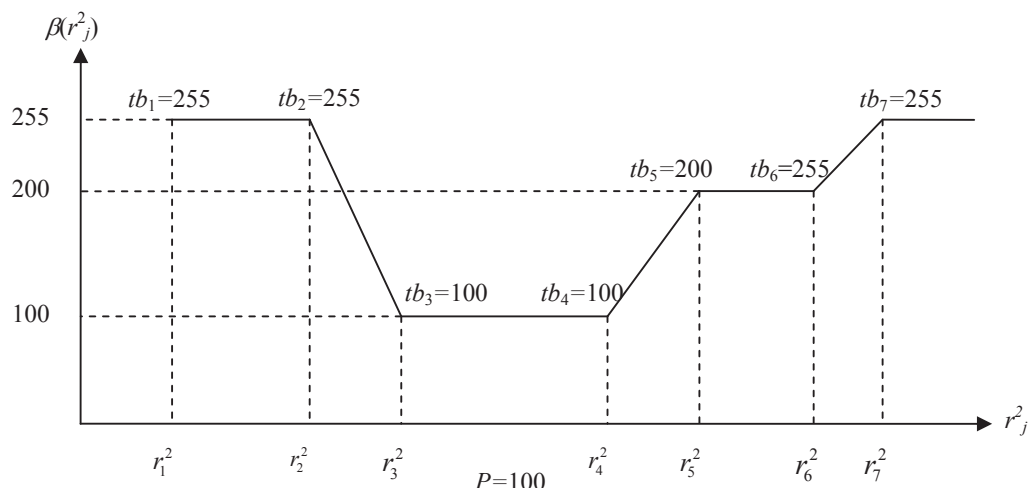


Рис. 2. Определение принадлежности точки к множеству темных лучей

Выделим из множества K точек объектов изображения подмножество OT и подмножество L линий объектов на изображении. Особыми точками $OT=\{ot_i\}$ будем считать точки типа разветвление, конец ветви и острый угол (рис. 3).

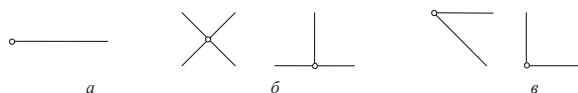


Рис. 3. Особые (узловые) точки изображения: а) конец ветви; б) разветвление; в) угол

Таким образом, точка принадлежит линиям объектов на изображении, если имеет два исходящих направления и угол между ними более 90° . На рис. 4 показан пример работы локального анализатора.

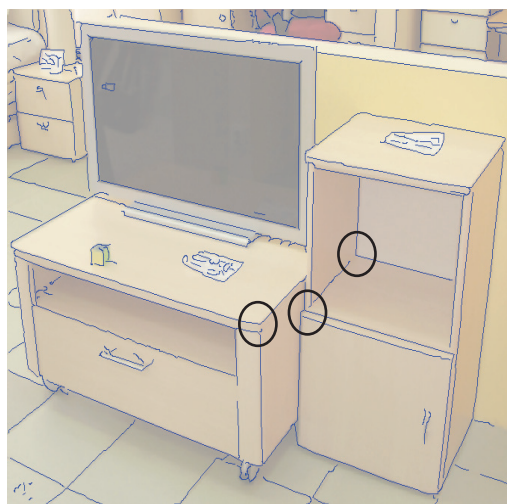


Рис. 4. Контур, полученные рекурсивным локальным анализатором 5×5 : до аппроксимации 4412 отрезков; после аппроксимации – 124 отрезка, 374 дуги

Границы площадных объектов. Эта дополнительная характеристика введена по результатам экспериментов. На аэрокосмических снимках часто встречаются площадные объекты, например, леса, озера и т. п., края которых необходимо выделить.

Аналогичная задача возникает при обработке рентгеновских, томографических и других снимков.

При стандартном режиме работы оператора анализа яркостей, находясь на границе площадного объекта, мы получим одно направление на яркостную середину, т. е. внутрь объекта, вместо необходимых нам двух направлений по «краям» (рис. 5).

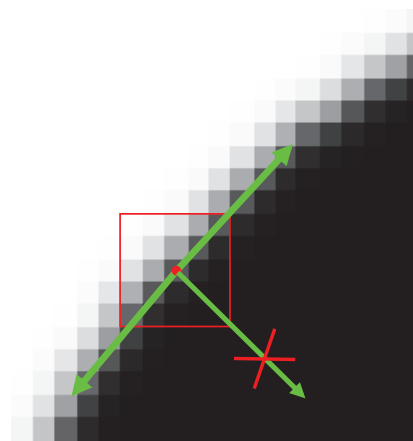


Рис. 5. Анализ границ площадного объекта

Поскольку направления по «краям» есть направления лучей на границах черного сектора, то изменим массив A так, что

$$a(KW) = \alpha(i) \text{ и } a(KW + 1) = \alpha(j),$$

$$\text{если } (tb(i) \neq 255) \wedge (tb(i-1) = 255) \wedge (tb(j) \neq 255) \wedge (tb(j+1) = 255) \wedge (i - j > 5),$$

где i, j изменяются $1 \dots 16$ и соответствуют направлениям (рис. 1); $\alpha(i), \alpha(j)$ – углы начала и конца черного сектора из пикселя $(g_{x,y})$; KW – количество ветвей из пикселя $(g_{x,y})$, значение изменяется от 1 до 8.

То есть если ширина темного сектора линии становится, например, больше 5 пикселей, то оператор анализа окрестности данной точки автоматически переходит в режим слежения по краю и вместо одного направления на яркостную середину сектора выдает два направления движения по «краям».

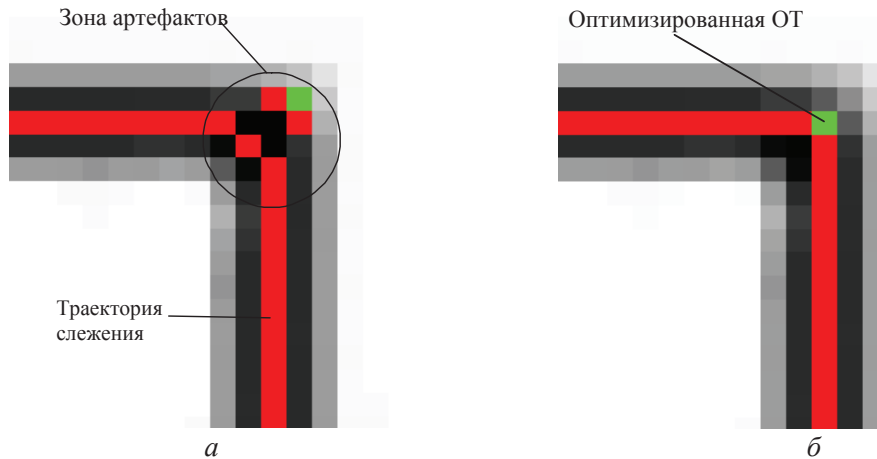


Рис. 6. Оптимизация положения особой точки

При выделении фрагментов объектов на изображении используются следующие методы и алгоритмы.

Корреляционная оптимизация положения особых точек. В процессе автономного анализа локальных областей изображения, который осуществляется построчным сканированием полутонового изображения с помощью оператора-анализатора локальных областей, как правило, в области сближения, пересечения или окончания линий выделяется не одна, а некоторое компактное подмножество (кластер) особых точек, которые образуют зону **артефактов**. Величина этой зоны зависит от ширины линий и размеров анализирующего фильтра (3×3, 5×5 и т. д.). Отбраковка ОТ в артефактной зоне позволяет не только снизить количество «шумовых» отрезков, но и повысить качество последующей аппроксимации контуров отрезками прямых и дуг.

Дифференциация и выбор ОТ, наиболее адекватной понятию «особая точка», происходит рекурсивно, путем корреляционного (сопоставительного) анализа ОТ и поиска локального экстремума по яркости (рис. 6). Для этого из любой найденной ОТ происходит смещение на шаг $h=1$ по направлениям исходящих ветвей, и если новая ОТ имеет меньшую среднюю яркость в своей окрестности, то рекурсивно вызывается данная функция. Тем самым, как-бы имитируется тремор зрачка глаза примата.

В результате весь кластер ОТ заменяется одной точкой, имеющей наиболее темную окрестность:

$$\exists ot_{\min} = \text{MIN}_k^1(ot_i),$$

где ot_{\min} — точка с минимальной яркостью из множества ОТ; ot_i — i -я точка из множества ОТ; $i=1...k$, где k количество точек в области ОТ; MIN_k^1 — функция выбора точки с минимальной яркостью из области ОТ.

Экстраполяционное уточнение особых точек, имитирующее инерционность перемещение зрачка при анализе линий («дрейфа» зрачка глаза примата), осуществляется для ОТ типа «разветвление» и «угол» путем расчета *мнимой точки* пересечения ветвей, исходящих из ОТ. Для этого из ранее отобранной ОТ вы-

полняется шаг $h=2$ (или более) в каждом из направлений ветвей (рис. 7). В полученных точках вычисляются направления «назад» $\alpha'_i = \alpha_i + \pi$, где α_i — направление продолжения ветви. Искомая уточненная ОТ есть точка пересечения всех направлений «назад».

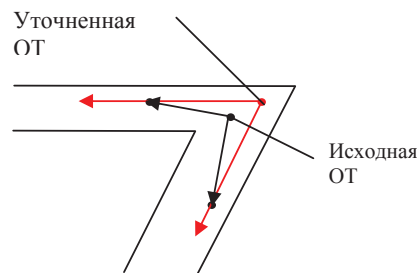


Рис. 7. Уточнение особой точки по пересечению исходящих ветвей

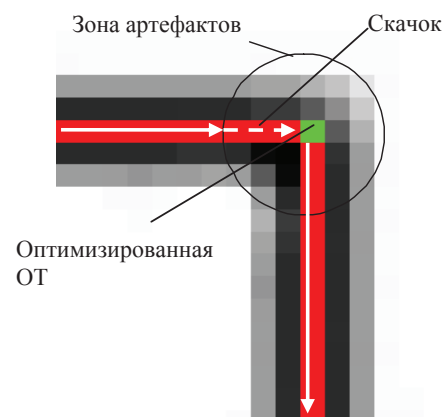


Рис. 8. Скачкообразный переход в оптимизированную особую точку

Трассировка линий. Следующий этап второго уровня анализа изображений — трассировка и слияние в цепочки точек, принадлежащих контурам, т. е. точек, в которых количество исходящих ветвей $KW=2$, и разность углов между ними больше 90° . Началом и концом цепочки являются особые точки.

Последовательно перебирая ОТ и все направления из них, мы выделим все цепочки (множество

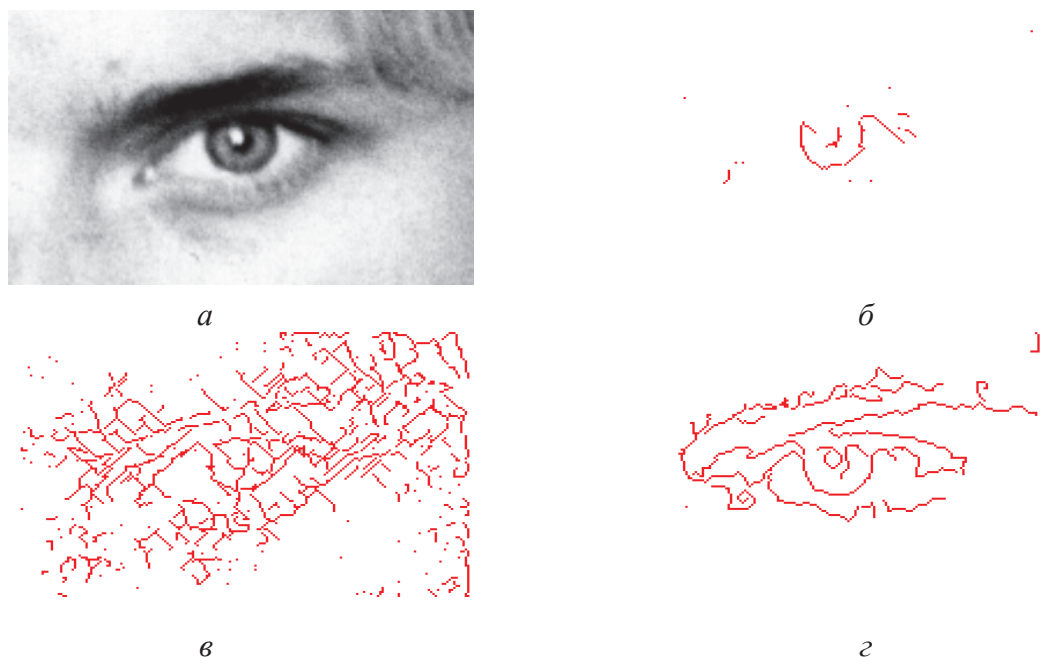


Рис. 9. Отслеживание контурных линий: а) исходное изображение; б) высокий порог на перепад яркости; в) низкий порог; г) адаптивный порог

К) на изображении. Каждая следующая точка цепочки вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned}x_s &= x_n + \cos(a_s); \\ y_s &= y_n - \sin(a_s),\end{aligned}$$

где x_n, y_n – точки, принадлежащие К (на первом шаге ОТ); a_s – направление на следующий пиксель (на первом шаге i -е направление из ОТ).

Известно, что процесс трассировки линий весьма чувствителен к помехам. Если на черно-белых (двухградационных) или цветных изображениях для выделения контуров объектов достаточно отслеживать смену цвета, то на полутоновых линиях определяются переходом через несколько градаций яркости. Во многих случаях контуры размыты в поперечнике и плавно исчезают при движении вдоль линии, постепенно сливаясь с окружением.

Для повышения устойчивости процесса трассировки предлагается применять выявленные в процессе моделирования и экспериментов дополнительные функции поиска продолжения:

1. *Захват ОТ* – скачкообразный переход в оптимизированную особую точку, как только линия входит в зону артефактов (рис. 8).

2. *Переход на слежение по краю* – автоматическая замена направления вглубь объекта на два направления движения по «краям» в местах, где линейный объект переходит в площадной.

3. *Повышение чувствительности локального анализатора* – если в процессе трассировки контура коли-

чество исходящих ветвей из центра локального анализатора становится меньше либо равно единице, то яркостной порог динамически уменьшается до тех пор, пока не будет найдено продолжение линии. Адаптация порога позволяет отслеживать на изображении даже очень тонкие (яркостно слабые) линии, если удалось «зацепиться» за такую линию на каком-то участке при исходном яркостном пороге (рис. 9). Если же изначально установить минимальный порог, то появляется много шумовых линий.

4. *Смена разрешающей способности* дополняет модель аккомодации хрусталика. Уровни разрешающей способности – это заданное пользователем количество изображений, где, начиная с исходного, каждое последующее сжимается вдвое. Оператор анализа локальных областей при сужении линии автоматически переходит на изображение с уменьшенной разрешающей способностью. Данный прием позволяет более корректно обрабатывать разрывы линий и помехи на изображении – линия остается линией при изменении ширины в 2–4 раза.

Таким образом, предложенные биоинспирированные алгоритмы, основывающиеся на достижениях современной физиологии механизмов зрения, позволяют повысить качество выделения информативных признаков на изображениях и, соответственно, анализа и извлечения знаний из изображений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-07-00632-а, 11-07-00783-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

2. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.

Поступила 24.09.2012 г.

УДК 519.688:53.083.98

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ПРИРОСТА, ОСНОВАННЫЙ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ

Ю.В. Волков*, **, В.А. Тартаковский*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

**Томский политехнический университет

E-mail: tv@imces.ru

Рассмотрен алгоритм определения площадей прироста и построения однородной картины годичных колец деревьев. Приведены результаты численного моделирования и результаты сопоставления расчетных параметров роста с параметрами, полученными в ходе анализа натуральных образцов.

Ключевые слова:

Биоиндикация, годичные кольца, сезонный рост, математическое моделирование, анализ сигналов, распознавание образов.

Key words:

Bioindication, tree-ring, vegetative growth, mathematical simulation, signal analysis, object identification.

Введение

Морфологическое строение деревьев позволяет получить информацию об окружающей среде, содержащей климатоэкологические параметры, оказывающие влияние на рост дерева. На поперечном сечении ствола дерева год за годом формируются годичные слои. Каждый слой представляет ежегодное нарастание древесины по диаметру [1–3]. В результате ежегодного прироста под влиянием климатоэкологических воздействий годичные слои приобретают неоднородную структуру и значительные отличия по форме в разных азимутальных направлениях, рис. 1, а, б.

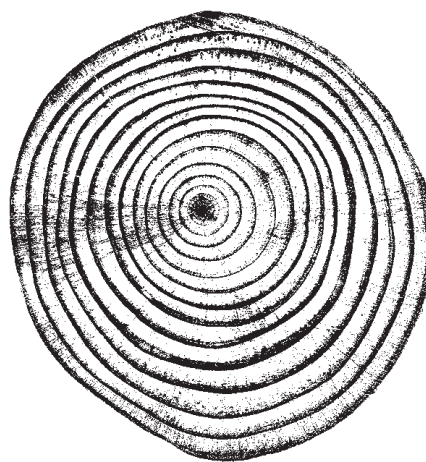
Анализ радиального прироста часто ведется по кернам, содержащим информацию о приросте в одном или нескольких радиальных направлениях поперечного сечения ствола дерева. Актуальной задачей является получение более полной информации о ежегодном радиальном приросте дерева, основанной на радиальном анализе картин годичных слоев, на поперечном спиле ствола дерева.

Комплексным показателем, характеризующим рост дерева, является площадь ежегодного прироста. В дендрохронологических исследованиях оценка климатических данных основывается на определении величины ежегодного прироста годичных колец деревьев в одном или нескольких азимутальных направлениях. При существующей неоднородности в картине колец показатели прироста значительно отличаются друг от друга в разных направлениях. Наиболее точную информацию о приросте могут дать площади прироста годичных слоев. Сложность применения для анализа площадей ежегодного прироста связана с ограниченной возможностью сбора древесных спилов. Для расчета площадей используют керны, отобранные с нескольких направлений ствола дерева, как правило, южного и северного. Полученные данные дают возможность рассчитать средний радиус колец, используемый для расчета площадей приростов с некоторой ошибкой усреднения [1, 3].

В данной работе разработан алгоритм расчета площадей прироста, основанный на геометриче-



а



б

Рис. 1. Изображение поперечного спила сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в виде: а) градаций серого цвета; б) бинарного изображения

ском представлении годичных колец деревьев, сформированных на поперечном сечении ствола дерева, в виде однородной картины концентрических окружностей. Наряду с построением однородной картины поперечного сечения ствола дерева и определением ошибки неоднородности восстановления площадей натуральных образцов в работе реализована задача вычисления параметров прироста.

В основу математического описания для построения однородной картины поперечного сечения ствола дерева положены следующие предположения:

1. Однородная структура годичных слоев может быть построена, если потенциал прироста биомассы в стволе дерева для каждого отдельного года постоянен, а значит, площадь ежегодного прироста дерева в радиальном направлении S_i есть величина постоянная.

$$S_i = \text{const}, i=1,2,\dots,N,$$

где i – текущий годичный слой; S_i – площадь текущего слоя; N – количество годичных слоев.

2. Ежегодный радиальный прирост с каждым последующим годом монотонно снижается.

$$\Delta R_i = R_i - R_{i-1}, R_0 = 0 \quad (1)$$

$$\Delta R_i \neq R_{i+1}, \text{ причем } \Delta R_i > \Delta R_{i+1},$$

где ΔR_i – величина ежегодного радиального прироста; R_i – радиус от центра до i -го слоя.

Исходя из сформулированных предположений, средняя площадь ежегодного прироста отдельного годичного слоя определяется путем деления общей площади поперечного сечения ствола дерева на количество годичных колец, сформированных за весь период роста:

$$\bar{S} = \frac{\pi \cdot R_n^2}{N}, \quad (2)$$

$$\bar{S}_i = S_i - S_{i-1}, S_0 = 0, i=1,2,\dots,N,$$

где \bar{S} – средняя площадь ежегодного прироста; S_i – площадь ежегодного прироста i -го годичного слоя; R_n – максимальный радиус.

Используя формулу для определения площади круга, радиусы окружностей, соответствующих годичным слоям, можно рассчитать по следующим уравнениям:

$$R_i = \sqrt{\frac{R_n^2}{N} + R_{i-1}^2}, R_1 = \sqrt{\frac{R_n^2}{N}}, i=1,2,\dots,N, \quad (3)$$

В соответствии с (1) и (3) ежегодный радиальный прирост определяется уравнением:

$$\Delta R_i = \sqrt{\frac{R_n^2}{N} + R_{i-1}^2} - \sqrt{\frac{R_n^2}{N} + R_{i-2}^2}, i=2,3,\dots,N. \quad (4)$$

На основе данного математического описания разработан алгоритм построения однородной картины поперечного сечения ствола дерева. Данный алгоритм реализует этапы:

I. Определение среднего значения радиуса максимального годичного кольца по кернам, соответствующим двум азимутальным направлениям: южному и северному.

II. Определение общей площади прироста по среднему значению радиуса максимального годичного кольца.

III. Вычисление средней ежегодной площади прироста годичных слоев в соответствии с ур. (2).

IV. Расчет ежегодных годовых приростов (4) и построение графического представления однородной картины поперечного сечения ствола дерева.

В ходе численного моделирования для поперечного спила сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) построена однородная картина поперечного сечения ствола дерева, рис. 2, б. Из графического пред-

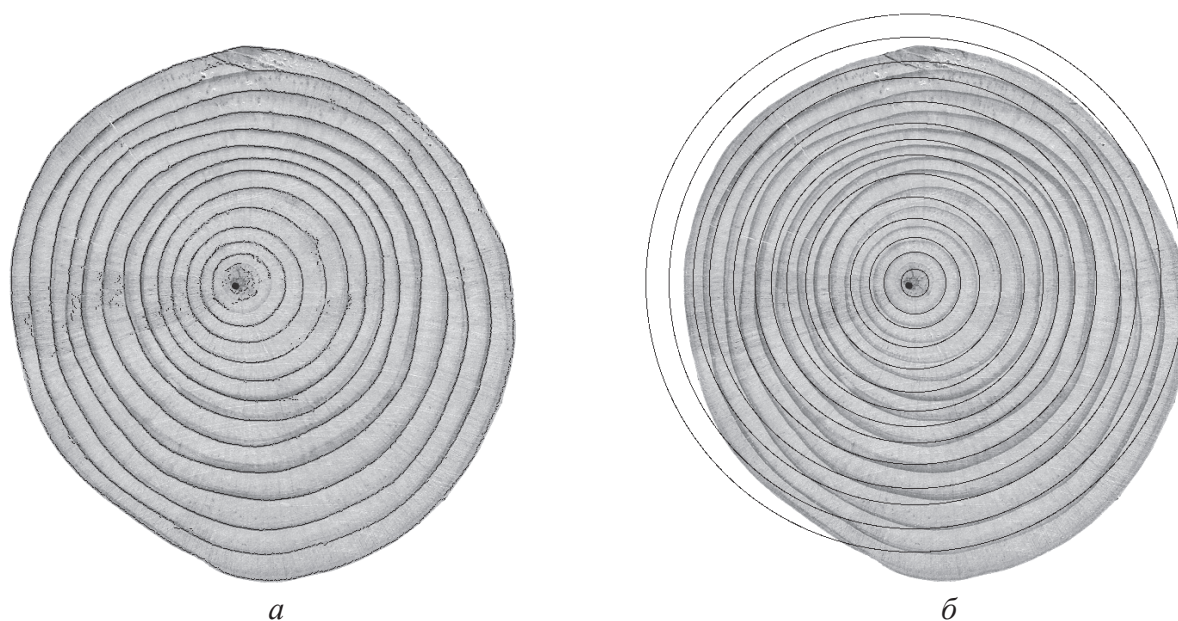


Рис. 2. Картины кольцевых структур, полученные при помощи: а) алгоритма распознавания колец; б) математического моделирования

ставления, наложенного на картину поперечного спила сосны обыкновенной, видно, насколько реальные годовичные кольца отличаются от concentрических окружностей, полученных в результате математического моделирования однородной картины.

Количественно оценить работу алгоритма можно путем сравнения площадей годовичных слоев, а также ежегодных радиальных приростов, полученных в результате расчета, и в ходе эксперимента с использованием натуральных данных. Для проведения оценки в работе использованы, наряду с ре-

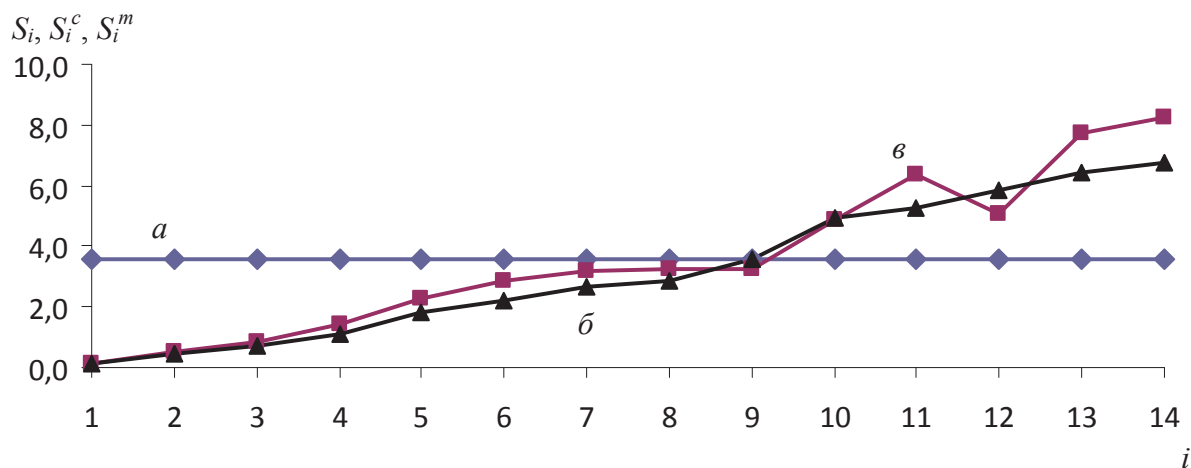


Рис. 3. Оценки площадей годовичных слоев, полученные в результате: а) математического моделирования; б) работы алгоритма распознавания колец; в) расчета по средним радиусам

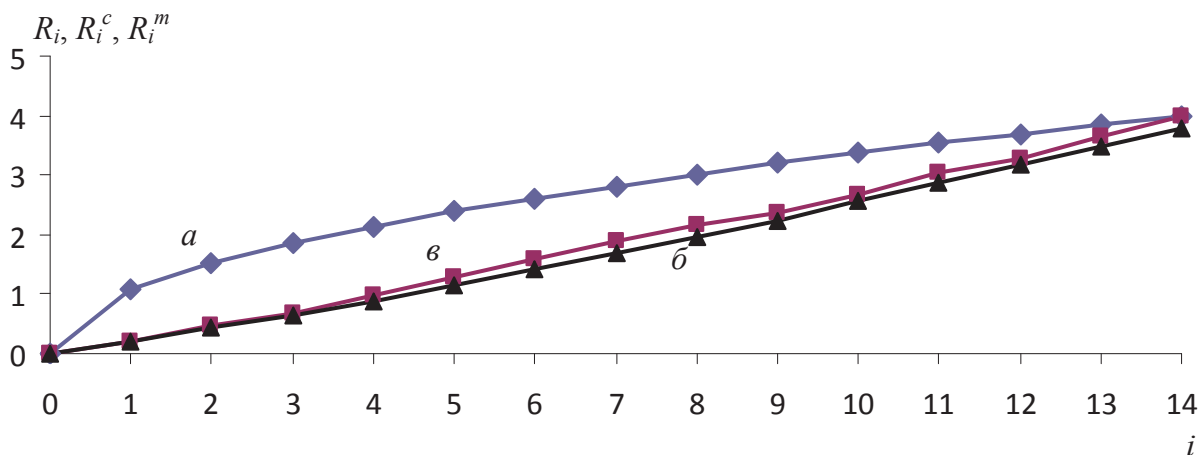


Рис. 4. Оценки радиусов годовичных слоев, полученные в результате: а) математического моделирования; б) работы алгоритма распознавания колец; в) расчета по средним радиусам

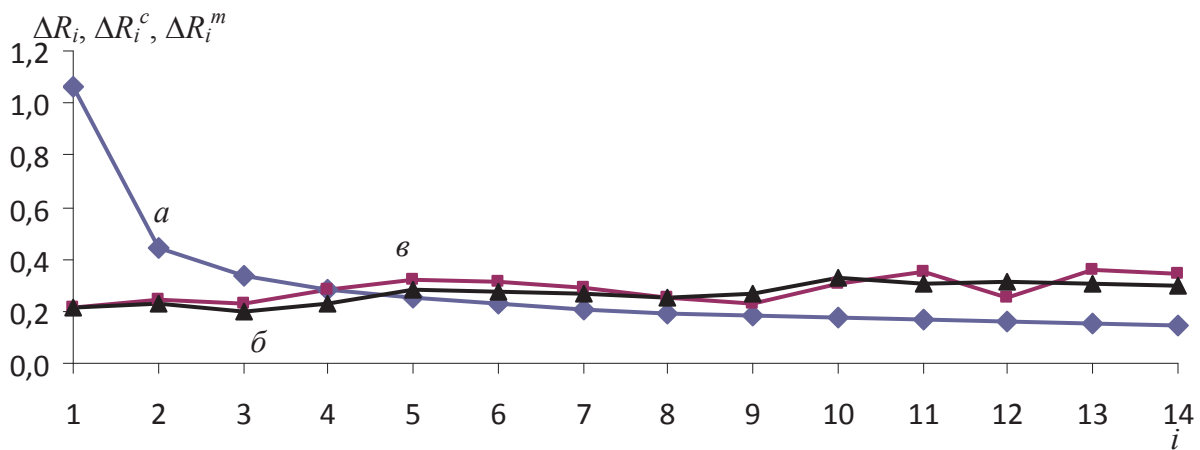


Рис. 5. Оценки ежегодных приростов годовичных слоев, полученные в результате: а) математического моделирования; б) работы алгоритма распознавания колец; в) расчета по средним радиусам

зультатами численного моделирования, результаты работы алгоритма распознавания колец, рис. 2, *a*, позволяющего с высокой точностью определить границы колец и рассчитать площади годовичных слоев [4, 5], а также результаты применяемого в дендрохронологии метода расчета площадей годовичных слоев по средним радиусам [1, 3].

На примере исследуемого образца сосны обыкновенной, рис. 1, *a*, определен радиус южного направления, равный 4,643 см, радиус северного 3,333 см, и диаметр, равный 7,976 см. При общем числе сформированных годовичных колец, равном 14, средний радиус максимального годовичного кольца составил 3,988 см. Подобным образом определены средние радиусы для каждого из 14 годовичных колец. Рассчитаны площади ежегодных приростов для каждого годовичного слоя S_i^c . В ходе исследования, по результатам математического моделирования, расчета по средним радиусам и применения алгоритма распознавания колец, получены оценки площадей ежегодных приростов годовичных слоев, рис. 3, оценки радиусов годовичных слоев, рис. 4, оценки ежегодных приростов, рис. 5.

Эталонными значениями для определения ошибки приняты результаты расчета параметров с применением алгоритма распознавания колец, как наиболее точные. Максимальное значение средней ошибки вычисления с использованием средних значений радиальных размеров годовичных колец составило для площадей 28,57 %, для радиусов – 11,50 %, для ежегодных приростов – 293,44 %. Максимальное значение средней ошибки, полученной в результате математического моделирования, составило для площадей 2324,94 %, для радиусов – 392,44 %, для ежегодных приростов

– 393,44 %. Аналогичные результаты получены для 9 подобных натуральных образцов одного вида.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что математическая модель, позволяющая сформировать однородную структуру, не соответствует выбранным натурным образцам. Исходя из биологических особенностей, рост деревьев может иметь периоды с характерными особенностями формирования годовичных колец. В период формирования молодого ствола возможны процессы интенсивного накопления биомассы в годовичных слоях, с последующим выравниванием скорости накопления [1]. Разработанная математическая модель должна быть применена для анализа зрелых деревьев. При использовании математической модели на практике необходима ее адаптация к биологическим особенностям роста и формированию ствола дерева.

Наличие ошибки при определении площадей по средним радиусам позволяет говорить об актуальности разработки математического описания для анализа картин годовичных колец и дальнейшего исследования взаимосвязи точности вычисления площадей от кривизны колец.

Заключение

Разработано математическое описание, алгоритм построения однородной структуры годовичных колец деревьев и вычисления площадей прироста годовичных слоев.

Реализовано сравнение трех разных методов вычисления площади ежегодного прироста годовичных слоев.

Проведена оценка результатов работы алгоритма и анализ причин несоответствия полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годовичных колец хвойных. – Новосибирск: Наука, 2000. – 232 с.
2. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Математическая модель микроструктуры годовичных слоев деревьев // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 117–120.
3. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Математическая модель годовичных колец деревьев на микро- и макроуровне // Новые методы в дендрозоологии / под ред. В.И. Воронина. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. – С. 150–152.
4. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Алгоритм анализа площадей годовичных слоев деревьев // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 112–117.
5. Isaev Y.N., Tartakovskiy V.A., Volkov Y.V. Mathematical Model of Tree-Rings as a Detector of the Ecological Field Dendro-Optical Analogy // Intern. Symp. on Science and Technology: Proceedings of the Vth Korea–Russia symp. – Мест проведения, 2001, CD. ISBN 0–7803–7008–2 (Softbound).

Поступила 24.09.2011 г.

УДК 681.5

ПРИМЕНЕНИЕ КВАДРАТИЧНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ РЕГУЛЯТОРОВ ВЕЩЕСТВЕННЫМ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

А.В. Воронин, Т.А. Щелканова

Томский политехнический университет
E-mail: Zene4ka@sibmail.com

Показана возможность использования метода квадратичного программирования для расширения возможностей вещественного интерполяционного метода синтеза регуляторов динамических объектов применительно к неминимально-фазовым объектам.

Ключевые слова:

Система автоматического управления, регулятор, неминимально-фазовый объект, вещественный интерполяционный метод, численная характеристика, квадратичное программирование.

Key words:

Control system, regulator, nonminimally-phase object, real interpolation method, numerical characteristic, quadratic programming.

Введение

Вещественный интерполяционный метод (ВИМ) синтеза регуляторов [1] относится к группе операторных методов, отличаясь от классических подходов видом прямого интегрального преобразования. Метод использует вещественное преобразование, заключающееся в переходе от оригинала $f(t)$ к функции-изображению $F(\delta)$, имеющему вещественную переменную δ .

Формула для получения вещественного изображения $F(\delta)$ следует непосредственно из формулы преобразования Лапласа при замене комплексной переменной s на вещественную переменную δ

$$F(\delta) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-\delta t} dt, \quad \delta \in [0, \infty).$$

На функцию $f(t)$ накладываются естественные ограничения: функция должна быть непрерывной, равной нулю для всех значений t , меньших, либо равных нулю, и должна быть абсолютно интегрируема:

$$\int_0^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty.$$

Особенностью ВИМ является то, что изображение функции $f(t)$ может быть получено как в аналитической форме, простой заменой в соответствующей формуле Лапласа комплексной переменной s на вещественную переменную δ , так и в виде графика $F(\delta)$ и набора отсчетов $F(\delta_i)$, называемого численной характеристикой. Предполагается, что численная характеристика несет полную информацию об исходной модели, и потому возможен однозначный переход к непрерывной форме $F(\delta)$. Операции в области изображений могут выполняться как с аналитическими зависимостями, так и с численными характеристиками. Достоинство такого подхода, по мнению авторов, состоит в том, что данный переход может быть выполнен численным способом с опорой на сравнительно простые машинные средства проектирования систем автоматического регулирования (САР).

Еще одним важным достоинством является возможность и простота получения приближенных решений различных задач, одной из которых является задача синтеза регуляторов.

Методика синтеза регулятора на основе ВИМ

При синтезе регулятора на основе ВИМ в [2] предлагается использовать хорошо известный компенсационный подход [3], в соответствии с которым необходимо предварительно сформировать желаемую передаточную функцию разомкнутой системы $W_{ж}(s)$. Тогда выражение для синтезируемого регулятора примет вид

$$W_{рег}(s) = W_{ж}(s) / W_0(s), \quad (1)$$

где $W_0(s)$ – передаточная функция объекта. Предполагается, что расчет $W_{рег}(s)$ по выражению (1) может выполняться с использованием как аналитических выражений $W_{ж}(s)$, $W_0(s)$, так и численных характеристик $W_{ж}(\delta)$, $W_0(\delta)$ в зависимости от формы задания желаемой замкнутой системы. Если $W_{ж}(s)$ и $W_0(s)$ заданы аналитически, то далее необходимо определиться с желаемым видом передаточной функции регулятора, а затем осуществить замену комплексной переменной s на вещественную δ . Для этого нужно выбрать узлы интерполирования δ_i таким образом, чтобы они лежали в области существенных изменений ЧХ [2]. В результате будут получены соотношения

$$W_{рег}(\delta_i) = W_{ж}(\delta_i) / W_0(\delta_i), \quad i = 1, n.$$

Число узлов интерполирования n выбирается так, чтобы можно было сформировать и решить квадратную систему алгебраических уравнений относительно искомого параметров регулятора [1, 2]. В целом все этапы синтеза регуляторов с использованием ВИМ просты, но получаемое решение является приближенным.

Существенным недостатком ВИМ, и в целом вещественного интегрального преобразования, представляется отсутствие достаточно жесткой связи между качеством и устойчивостью системы и ее численной характеристикой. Для преобразований Ла-

пласа или Фурье такая связь существует и активно используется при анализе и синтезе систем автоматического регулирования в виде, например, алгебраических и частотных критериев устойчивости.

Основной идеей ВИМ является предположение, что малым изменениям параметров системы соответствуют малые изменения их численных характеристик. Следовательно, если выбрать желаемую САР, обладающую требуемыми временными характеристиками $h(t)$ или $w(t)$, получить ее численную характеристику, например, подстановкой в $W_{ж}(s)$ вещественной переменной δ вместо комплексной переменной s , затем определить численную характеристику регулятора, обеспечивающую численной характеристике замкнутой системы близость к численной характеристике желаемой системы и, наконец, восстановить передаточную функцию регулятора по его численной характеристике, то полученная система будет близка к желаемой. Очевидно, что во всей этой процедуре особую роль играет метод приближения численной характеристики регулятора к желаемой, в котором можно выделить, по крайней мере, два фактора, влияющих на качество получаемого результата – малое число узлов интерполирования и отсутствие каких-либо ограничений на коэффициенты $W_{pec}(s)$.

Сделанное в [2] предположение о том, что для большинства технических объектов достаточным является регулятор не выше 2-го порядка, выглядит достаточно реалистичным, однако предполагает, что расчет коэффициентов регулятора производится максимум по 5 точкам численной характеристики, выбор которых весьма слабо формализован. Представляется полезным использовать значительно большее число точек, ориентируясь не на точное решение системы алгебраических уравнений, а на аппроксимирующее приближение. Усложнение процедуры расчета с вычислительной точки зрения не играет при современных средствах проектирования особой роли. Это, естественно, не отменяет предложенных в [2] методов выбора наиболее информативных областей численной характеристики.

Отсутствие ограничений на коэффициенты $W_{pec}(s)$ часто приводит к получению неустойчивых или негрубых замкнутых систем. При этом некоторые важные ограничения в рамках принятого 2-го порядка регулятора могут быть сформулированы достаточно просто. Известно, что максимальная грубость системы достигается обычно при использовании минимально-фазовых регуляторов. Это также исключает возможность сокращения положительных нулей и полюсов регулятора и объекта, что является обязательным условием работоспособности полученной замкнутой системы. Для синтеза минимально-фазового регулятора 2-го порядка достаточно наложить условия положительности всех его коэффициентов.

Для введения дополнительных ограничений предлагается рассматривать задачу приближения численной характеристики регулятора к желаемой численной характеристике как задачу нелинейно-

го, в частности квадратичного, программирования, которая имеет хорошо разработанную алгоритмическую и программную поддержку, в частности в среде Matlab.

Постановка и решение задачи синтеза регулятора на основе ВИМ как задачи квадратичного программирования

Задача квадратичного программирования в рамках программы QUADPROG раздела Optimization Toolbox Matlab ставится как задача расчета вектора значений переменных при условиях

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}x^T H x + f^T x &\rightarrow \inf, \\ Ax &\leq b, \\ Aeg \cdot x &= beg, \\ lb &\leq x \leq ub, \end{aligned}$$

где H и h – весовая матрица и весовой вектор, соответственно; A – матрица ограничений-неравенств; Aeg – матрица ограничений равенств; lb и ub – векторы ограничений x сверху и снизу [4].

Пусть желаемая численная характеристика задана в виде n отсчетов p_i в узлах δ_i интерполирования. Регулятор рассчитывается в виде

$$W_{pec}(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}. \quad (2)$$

Введем вектор $x^T = (b_2, b_1, b_0, a_2, a_1)$. Задача синтеза регулятора может быть сформулирована как задача квадратичного программирования следующим образом. Требуется минимизировать функционал $f(x) = e^T \cdot H e$ при условиях

$$\begin{aligned} b_2 \delta_1^2 + b_1 \delta_1 + b_0 - p_1 \delta_1^2 a_2 - p_1 \delta_1 a_1 + e_1 &= p_1, \\ &\dots \\ b_2 \delta_n^2 + b_1 \delta_n + b_0 - p_n \delta_n^2 a_2 - p_n \delta_n a_1 + e_n &= p_n, \\ b_2 &\geq 0, \\ b_1 &\geq 0, \\ b_0 &\geq 0, \\ a_2 &\geq 0, \\ a_1 &\geq 0. \end{aligned}$$

Вектор e представляет собой невязки приближенного решения системы линейных уравнений в узлах интерполирования. Если $H=I$, то наложенные условия представляют собой поиск наилучшего квадратичного приближения при дополнительных условиях положительности всех коэффициентов регулятора. Выбор матрицы H иного вида позволяет изменить вес невязок в тех или иных узлах интерполирования.

Применим предложенный подход для устойчивой системы. Примем $W_0(s) = \frac{15}{s^2 + s + 15}$. Передаточную функцию желаемой замкнутой системы

определим по заданным показателям качества в виде

$$W_{зам}(s) = \frac{5}{s^2 + 4s + 8}. \quad (3)$$

Регулятор будем синтезировать в виде (2).

Следуя методике ВИМ [1], получим передаточную функцию желаемой разомкнутой системы. Она равна

$$W_{раз}(s) = \frac{5}{s^2 + 4s + 3}.$$

Далее определим коэффициент b_0 , исходя из желаемого коэффициента передачи в статическом

режиме. Имеем $b_0 = \frac{5}{3} / \frac{15}{15} = 1,66$.

Интервал размещения узлов интерполирования возьмем равным интервалу существенных изменений численной характеристики замкнутой системы. В качестве такового обычно используется интервал 90 % изменения численной характеристики относительно ее значения при $\delta=0$. Исходя из изложенного запишем

$$\frac{5}{\delta^2 + 4\delta + 8} = 0,1 * \frac{5}{8}.$$

Легко определить, что численная характеристика существенно меняется (до 10 % от начального состояния) на интервале от 0 до 7. Отсюда максимальное значение параметра δ примем равным 7.

На данном интервале возьмем 8 точек. При этом первая точка, $\delta=0$, уже занята и в расчетах использоваться не будет.

Общий вектор неизвестных переменных имеет 11 составляющих $x=(b_1, b_2, a_1, a_2, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7)$, из которых первые четыре – коэффициенты регулятора, остальные – невязки алгебраических уравнений в узлах интерполирования.

Ограничения на решение задачи квадратичного программирования имеют вид

$$b_2\delta_1^2 + b_1\delta_1 - p_1\delta_1^2 a_2 - p_1\delta_1 a_1 + e_1 = p_1 - b_0,$$

...

$$b_2\delta_7^2 + b_1\delta_7 - p_7\delta_7^2 a_2 - p_7\delta_7 a_1 + e_7 = p_7 - b_0,$$

$$b_2 \geq 0,$$

$$b_1 \geq 0,$$

$$a_2 \geq 0,$$

$$a_1 \geq 0.$$

Критерием минимизации является функция

$$F = \sum_{i=1}^7 e_i^2.$$

Расчеты дали практически точное совпадение численных характеристик желаемой и синтезируемой систем (рис. 1) при следующих параметрах регулятора

$$W_{рег}(s) = \frac{0,11s^2 + 0,11s + 1,67}{0,33s^2 + 1,33s + 1}.$$

Система получилась устойчивой, и качество процессов полностью соответствует желаемому. На рис. 2 показаны графики переходных процессов при одновременном моделировании желаемой и синтезированной систем.

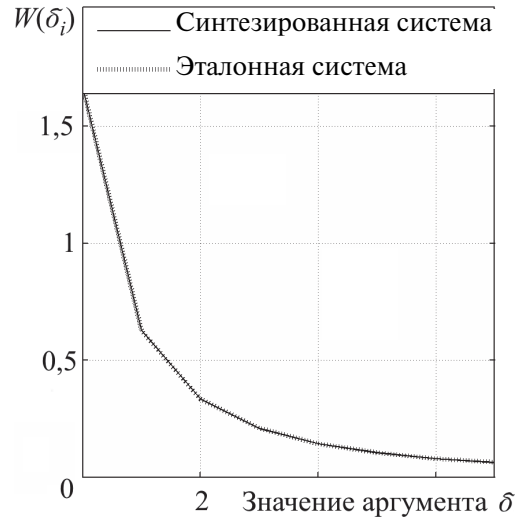


Рис. 1. Численные характеристики синтезированной и эталонной систем

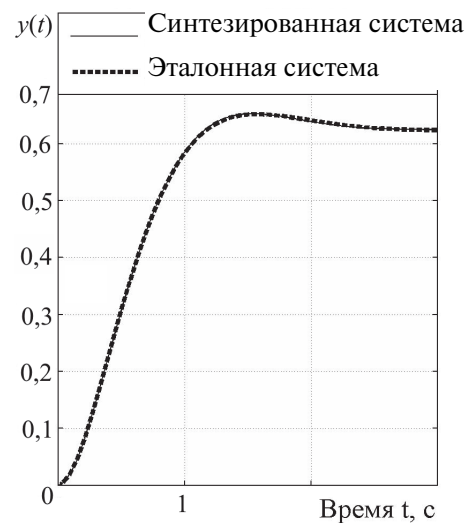


Рис. 2. Зависимости значений выходных сигналов $y(t)$ от времени t в синтезированной и эталонной системах

Компенсационный характер полученного регулятора хорошо виден по распределению нулей и полюсов замкнутой системы на рис. 3. Нули регулятора компенсируют полюсы объекта. Полюсы регулятора формируют желаемую динамику замкнутой системы.

Вместе с тем, анализ показал, что если ограничиться минимально-фазовыми объектами, то особого выигрыша от приближенных вычислений и ограничений на знаки коэффициентов регулятора нет. По крайней мере, для объекта 2-го порядка. Однако ситуация принципиально меняется при переходе к неминимально-фазовым объектам, в частности, к объектам с правыми нулями.

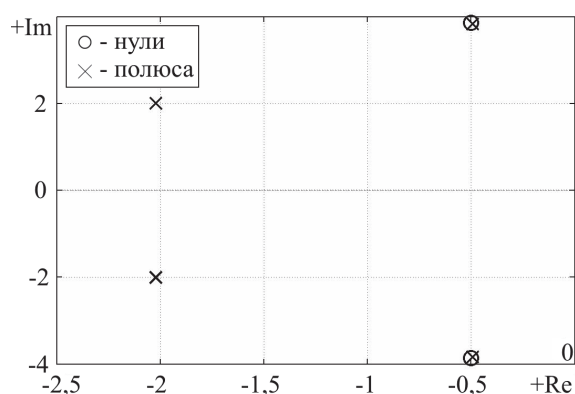


Рис. 3. Нули и полюсы замкнутой САР

Рассмотрим неминимально-фазовый объект вида

$$W_0(s) = \frac{-s + 15}{s^2 + s + 15},$$

имеющий один правый нуль. Будем считать, что передаточная функция желаемой замкнутой системы и структура регулятора заданы выражениями (3) и (2).

Как и ранее, определим коэффициент b_0 , исходя из желаемого коэффициента передачи в статическом режиме. Имеем $b_0 = \frac{5}{3} \cdot \frac{-15}{15} = -1,66$.

Передаточная функция регулятора получается в

виде $W_{рег}(s) = \frac{0,086s^2 + 1,67}{0,01s^2 + 1,4s + 1}$.

В результате расчета параметров регулятора с использованием программы QUADPROG при единичных весах ошибок по всем узлам интерполирования получены численные характеристики, приведенные на рис. 4. На рис. 5 показаны графики переходных процессов при одновременном моделировании желаемой и синтезированной систем.

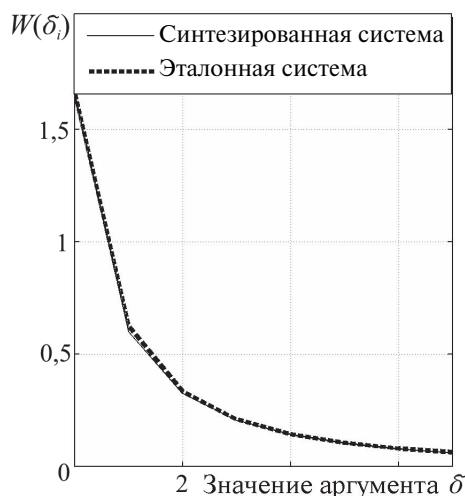


Рис. 4. Численные характеристики синтезированной и эталонной систем

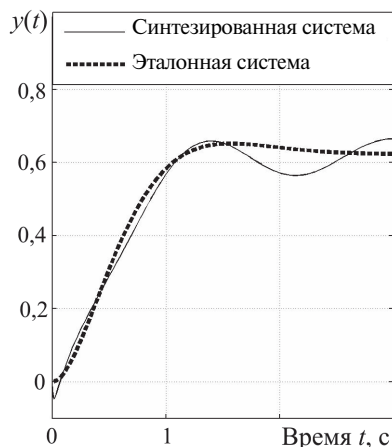


Рис. 5. Зависимости значений выходных сигналов $y(t)$ от времени t в синтезированной и эталонной системах

Расчеты по методике [2] без ограничений на знаки коэффициентов регулятора привели к выражению

$$W_{рег}(s) = \frac{0,041s^2 + 0,038s + 1,67}{-0,081s^2 + 1,43s + 1}.$$

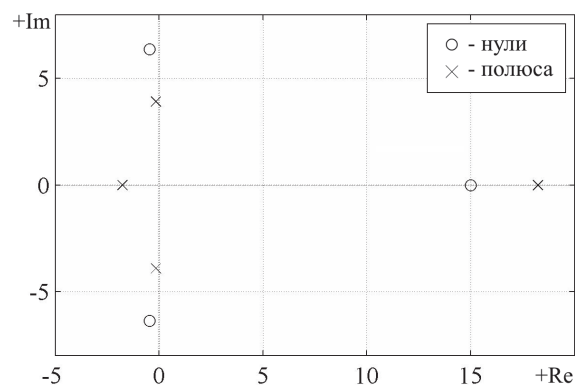


Рис. 6. Нули и полюсы замкнутой САР (o – нули; x – полюса)

В результате замкнутая система неустойчивая. Неустойчивость связана с тем, что в регуляторе формируются правые полюсы, стремящиеся скомпенсировать правые нули объекта (рис. 6).

Выводы

1. Исследована возможность использования квадратичного программирования для решения задачи синтеза регуляторов по вещественному интерполяционному методу.
2. Показано, что полученные результаты позволяют рекомендовать метод квадратичного программирования и реализующие его программные средства в среде Matlab для расширения возможностей вещественного интерполяционного метода синтеза регуляторов на линейные объекты управления с правыми нулями.
3. Метод позволяет повысить качество приближения численных характеристик за счет увеличения числа узлов интерполирования и упрощения процедуры варьирования весовых коэффициентов для ошибок приближения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орурк И.А. Новые методы синтеза линейных и некоторых нелинейных динамических систем. – М.: Наука, 1965. – 206 с.
2. Алексеев А.С., Антропов А.А., Гончаров В.И., Замятин С.В., Рудницкий В.А. Вещественный интерполяционный метод в задачах автоматического управления. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 217 с.
3. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
4. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7: программирование, численные методы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.

Поступила 14.09.2012 г.

УДК 004.932

РАСПОЗНАВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ТЕКСТОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Фан Нгок Хоанг, Буй Тхи Тху Чанг, В.Г. Спицын

Томский политехнический университет
E-mail: hoangpn285@gmail.com

Предложен новый способ распознавания печатных текстов, основанный на совместном применении вейвлет-преобразования Хаара и метода главных компонент. Разработан алгоритм и создано программное обеспечение для распознавания печатных текстов. Приведен пример работы и представлены результаты тестирования программы. Показано, что использование предложенного оригинального алгоритма дает возможность эффективного распознавания печатных текстов.

Ключевые слова:

Распознавание печатных текстов, метод главных компонент, вейвлет-преобразование.

Key words:

Text recognition, principal component analysis, wavelet transform.

Введение

Распознавание образов является одной из самых изученных задач в таких областях, как цифровая обработка изображений, компьютерное зрение, биометрия, создание интеллектуальных систем безопасности и контроля доступа и т. п. Тем не менее, в области распознавания образов продолжают представлять большой научный и практический интерес такие задачи как распознавание лиц, жестов, текстов, отпечатков пальцев, печатных и рукописных текстов. Метод главных компонент и вейвлет-преобразование являются способами для получения характеристик изображения. В задаче распознавания образов они успешно применяются в процессе сравнения компонент, характеризующих неизвестное изображение, с компонентами, соответствующими известным изображениям. В работах [1, 2] предложен алгоритм, основанный на методе Виолы–Джонса, вейвлет-преобразовании и методе главных компонент для распознавания множества лиц на видеопоследовательности в режиме реального времени. Авторы также предложили алгоритм, основанный на алгоритме CAMShift, методе Виолы–Джонса, вейвлет-преобразовании и методе главных компонент для распознавания жестов на видеопоследовательности в режиме реального времени.

Целью данной работы является создание нового алгоритма, основанного на комбинации вейвлет-преобразования Хаара и метода главных компонент для распознавания печатных текстов с высокой скоростью обработки.

Вейвлет-преобразование

Главной задачей в каждом виде обработки изображения является нахождение эффективного представления, позволяющего отобразить его в компактной форме. В современной теории и практике сигналов, в частности при спектральном анализе, используются сигналы специального вида – вейвлеты. В работах [3, 4] представлены разложение изображения и извлечение его признаков для классификации изображений самолетов на основе применения вейвлет-преобразования Хаара и многослойной нейронной сети. В работе [5] используются вейвлет-преобразования Хаара и Добеши для извлечения признаков изображения отпечатка пальца. Эти признаки являются входами многослойной нейронной сети для классификации отпечатков пальцев по типам папиллярных узоров. В данной работе используется вейвлет-преобразование Хаара для извлечения признаков изображения букв, цифр и знаков в печатном тексте. Пример извлечения признаков изображения буквы «а» представлен на рис. 1.

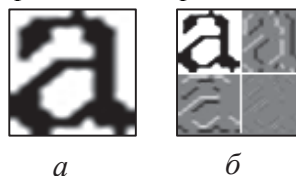


Рис. 1. Извлечение признаков изображения буквы «а»: а) исходное изображение; б) полученные признаки на основе применения вейвлет-преобразования Хаара

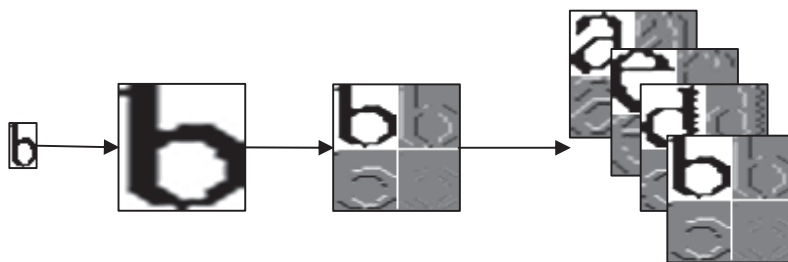


Рис. 2. Процесс сохранения признаков буквы «b» в базе данных

Метод главных компонент

Метод главных компонент (*Principal Component Analysis, PCA*) – один из наиболее распространенных методов для уменьшения размерности данных, позволяющий обеспечить потерю наименьшего количества информации. Он заключается в линейном ортогональном преобразовании входного вектора P размерности N в выходной вектор Q размерности M , $M < N$. Компоненты вектора Q являются некоррелированными, и общая дисперсия после преобразования остаётся неизменной.

Вычисление главных компонент сводится к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы, которая рассчитывается для изображения. Сумма главных компонент, умноженных на соответствующие собственные вектора, является реконструкцией изображения. Для каждого изображения объекта вычисляются его главные компоненты. Обычно берётся от 5 до 200 главных компонент. Остальные компоненты кодируют мелкие различия между объектами и шум. Процесс распознавания заключается в сравнении главных компонент неизвестного изображения с компонентами всех известных изображений. Из базы данных выбираются изображения-кандидаты, имеющие наименьшее расстояние от входного (неизвестного) изображения [6].

Алгоритм распознавания печатных текстов

Целью данной работы является распознавание печатных текстов с высокой скоростью. Для решения задачи распознавания печатных текстов предложен алгоритм на основе применения вейвлет-преобразования Хаара и метода главных компонент. Предложенный алгоритм состоит из двух процессов: сохранения признаков известных пе-

чатных цифр, букв и знаков в базе данных; распознавания печатных текстов.

Процесс сохранения признаков известных печатных цифр, букв и знаков происходит следующим образом (рис. 2.):

Шаг 1. Увеличение размера области изображения печатного символа до 64×64 пикселей.

Шаг 2. Применение к полученному на шаге 1 изображению вейвлет-преобразования для извлечения признаков символа.

Шаг 3. Сохранение извлеченных признаков в базе данных.

Процесс распознавания печатных текстов осуществляется следующим образом (рис. 3):

Шаг 1. Определение верхней и нижней границ строк в тексте.

Шаг 2. Определение возможных областей изображений символов в каждой строке.

Шаг 3. Определение точной области изображения каждого символа.

Затем осуществляются следующие шаги для обработки каждого символа в тексте (рис. 4):

Шаг 4. Увеличение размера области изображения символа до 64×64 пикселей.

Шаг 5. Применение к полученному на шаге 4 изображению вейвлет-преобразования для извлечения признаков символа.

Шаг 6. Сравнение полученных признаков с признаками, хранящимися в базе данных на основе применения метода главных компонент.

Численные эксперименты

Для распознавания печатных текстов в реальном времени на языке объектно-ориентированного программирования C# с использованием библиотеки OpenCV разработано программное обеспечение.

The diagram shown in remediation workflow, depicted in Figure 1 ma applications, possibly f

a

The diagram shown in remediation workflow, depicted in Figure 1 ma applications, possibly f

б

The diagram shown in remediation workflow, depicted in Figure 1 ma applications, possibly f

в

The diagram shown in remediation workflow, depicted in Figure 1 ma applications, possibly f

д

Рис. 3. Процесс обнаружения областей изображений символов в тексте: а) исходный текст; б) определение верхней и нижней границ строк; в) определение возможных областей изображений символов; д) определение точных областей изображений символов

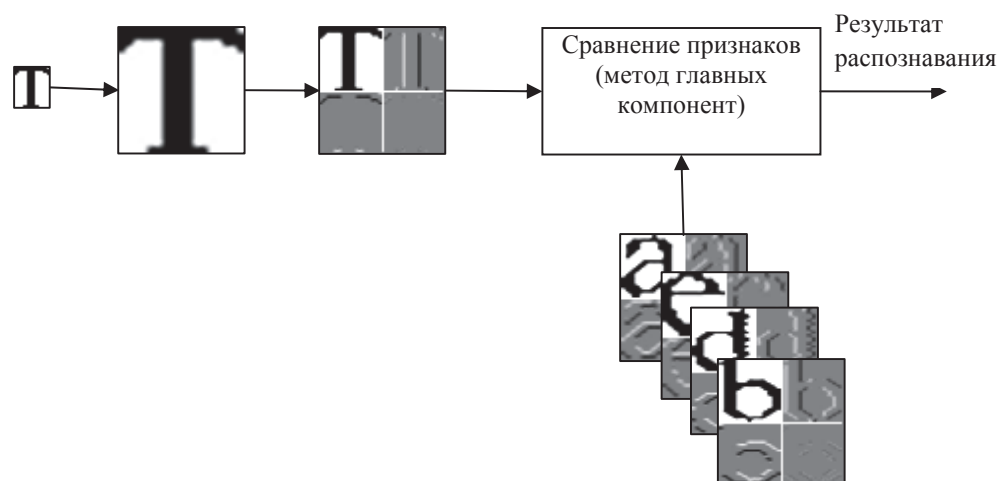


Рис. 4. Функциональная схема процесса распознавания каждого символа в тексте

Распознавание печатных текстов

Для обучения предложенного алгоритма используются два типа шрифта *Times New Roman* и *Arial* с различными размерами: 16, 18, 20, 22, 24, 26. Пример цифр, букв и знаков, используемых при обучении, представлен на рис. 5.

Для тестирования предложенного алгоритма используются сканированные тексты. Пример использованного текста представлен на рис. 6.

Пример работы программы распознавания печатных текстов представлен на рис. 7. Результаты экспериментов показали, что точность распознавания печатных текстов предложенного алгоритма составляет ~70 %. Скорость распознавания символов достаточна для обработки текста в режиме реального времени. Например, на процессоре Intel Core 2 Duo с тактовой частотой 2,0 GHz обработка текста осуществляется со скоростью 12–14 символов в секунду.

Анализ результатов и направление дальнейших исследований

Анализ результатов проведенных численных экспериментов выявил следующие проблемы:

- Происходит неполное разделение всех цифр, букв и знаков в тексте, например слово «for» разделяется на «fo» и «r», и в результате программа распознает слово «for» как «mr» (рис. 7).
- Происходит неправильное распознавание следующих пар цифр, букв и знаков: буква «e» распознается как буква «с»; цифра «1» как буква «l»; буква «s» как буква «S»; буква «c» как буква «C»; буква «v» как буква «V»; знак «.» как знак «'»; буква «A» как знак «^»; буква «o», как буква «O» или цифра «0».

Указанные недостатки снижают эффективность предложенного алгоритма распознавания печатных текстов. Для повышения эффективности его работы в дальнейшем планируется решить следующие задачи:

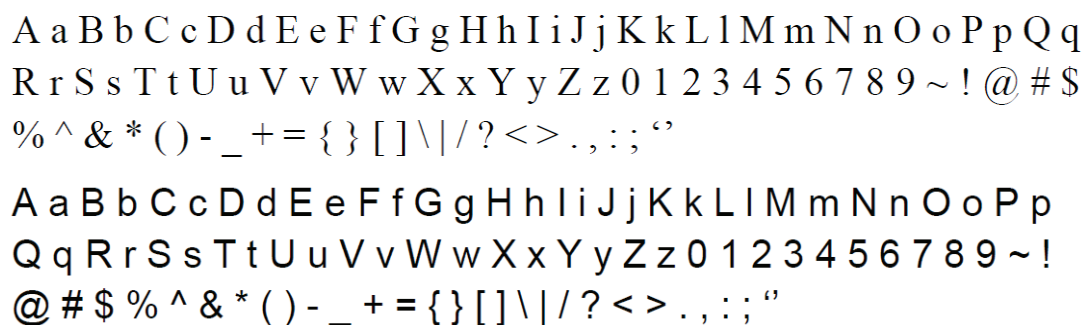


Рис. 5. Пример цифр, букв и знаков, используемых при обучении предложенного алгоритма

Tool responsible for evaluating assessment results, remediation policy, and remediation details to produce specific remediation tasking instructions for remediation tools.

Рис. 6. Пример печатного текста, использованного при тестировании предложенного алгоритма

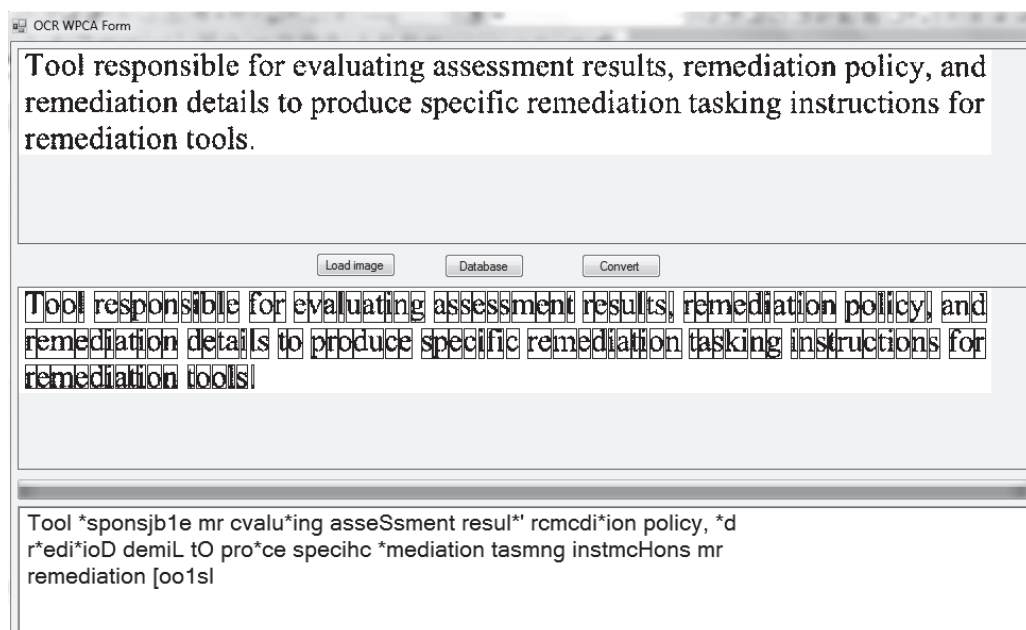


Рис. 7. Пример работы программы, реализующей предложенный алгоритм

- Осуществление полного разделения всех цифр, букв и знаков в тексте.
- Уменьшение числа неправильных распознаваний между перечисленными выше парами цифр, букв и знаков.

Предложенный алгоритм в настоящее время работает только с англоязычными текстами, представленными символами расположенными вертикально в горизонтальных строках. Поэтому для продолжения в дальнейшем работы в данном направлении актуальными являются следующие задачи:

1. Распознавание вертикальных печатных текстов на русском языке.
2. Распознавание наклонных печатных текстов на английском и русском языке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буй Тхи Тху Чанг, Фан Нгок Хоанг, Спицын В.Г. Распознавание лиц на основе применения метода Виолы–Джонса, вейвлет-преобразования и метода главных компонент // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 5. – С. 54–59.
2. Буй Тхи Тху Чанг, Фан Нгок Хоанг, Спицын В.Г. Распознавание лиц и жестов на основе применения вейвлет-преобразования и метода главных компонент // Нелинейный мир. – 2012. – Т. 10. – № 6. – С. 371–379.
3. Буй Тхи Тху Чанг, Спицын В.Г. Разложение цифровых изображений с помощью двумерного дискретного вейвлет-преобразования и быстрого преобразования // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 73–76.

Выводы

1. Предложен и описан новый высокоскоростной способ распознавания печатных текстов, основанный на совместном применении вейвлет-преобразования Харра и метода главных компонент.
2. Разработан оригинальный алгоритм и реализована программа распознавания печатных текстов в режиме реального времени на языке объектно-ориентированного программирования C#.
3. Анализ результатов компьютерных экспериментов позволяет сделать вывод об успешной работе созданного алгоритма и программы при распознавании печатных текстов.
4. Буй Тхи Тху Чанг, Фан Нгок Хоанг, Спицын В.Г. Алгоритмическое и программное обеспечение для классификации цифровых изображений с помощью вейвлет-преобразования Хаара и нейронных сетей // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 103–106.
5. Фан Нгок Хоанг, Спицын В.Г. Алгоритмы для классификации отпечатков пальцев на основе применения фильтра Габора, вейвлет-преобразования и многослойной нейронной сети // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 5. – С. 60–64.
6. Pearson K. On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space // Philosophical Magazine. – 1901. – V. 2. – № 6. – P. 559–572.

Поступила 14.09.2012 г.

УДК 004.415

КОНТРОЛЬ ЛОГИЧЕСКИХ ВЫВОДОВ В СЕМАНТИЧЕСКИХ БАЗАХ ДАННЫХ

Хоанг Ван Куэт, А.Ф. Тузовский

Томский политехнический университет
E-mail: student8050@sibmail.com

Рассматривается метод решения задачи контроля доступа пользователей к семантическим базам данных, содержащим простые утверждения, состоящие из трех элементов (триплетов). Использование данного метода позволяет не допустить получения данных, на основе которых пользователи могут логически вывести не разрешенную им информацию. Сделана постановка задачи контроля логических выводов на получаемых данных, и предложены алгоритмы ее решения.

Ключевые слова:

Семантическая база данных, триплеты, контроль доступа, логический вывод.

Key words:

Semantic database, triple, security access, inference.

Введение

Одним из современных направлений развития информационных технологий является переход к работе с семантикой информации. В основном эти работы связаны с созданием следующего поколения Web сети, называемой Semantic Web [1]. Работы в данном направлении инициируются и активно поддерживаются организацией W3C, которая уже приняла набор стандартов, связанных с Semantic Web, таких, как языки RDF, RDFS, OWL, SPARQL и RIF. Совместно все эти стандарты называются семантическими технологиями. Взаимосвязи между языками Semantic Web показаны на рис. 1.

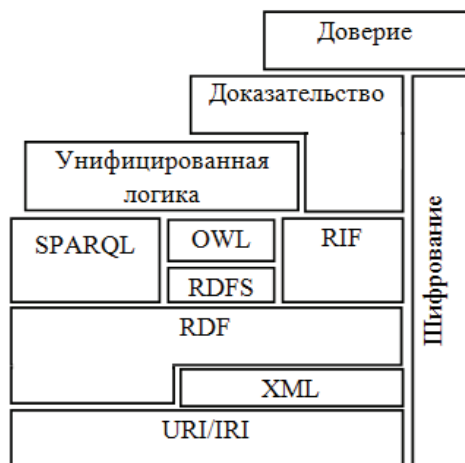


Рис. 1. Стек технологий концепции Semantic Web

С помощью языка RDF можно описывать информацию в виде простых утверждений, называемых триплетами, которые состоят из трех элементов: субъекта, предиката и объекта. Для описания семантики данных, созданных с использованием RDF, и выполнения на них логических выводов требуется создавать семантические модели, описывающие наборы понятий и отношений между ними. Такие семантические модели также часто называются *онтологиями*, и для их описания используются такие языки из стека семантических

технологий, как RDFS и OWL, которые также основаны на RDF.

Для хранения больших объемов RDF данных в настоящее время разработаны специальные семантические базы данных, как, например, Virtuoso, Sesame [2]. Для описания запросов к таким базам данных используется специальный язык SPARQL [3].

Так как с развитием нового поколения Web сети будет создаваться большое количество семантических баз данных, очень важной становится проблема их защиты от несанкционированного доступа. По сравнению с обеспечением безопасности реляционных баз данных, проблема семантических баз данных усложняется тем, что на основе получения разрешенных наборов простых утверждений пользователи могут путем применения логического вывода получать новую, не разрешенную им информацию. В настоящее время уже предложены разные подходы [4] для обеспечения безопасности работы с такими данными, но они не предоставляют средств проверки возможности выполнения пользователями нежелательных логических выводов на доступных данных.

Основные понятия обеспечения безопасности семантических баз данных

Для постановки задачи обеспечения безопасности семантических баз данных вначале дадим точные определения таких базовых понятий, как семантическая база данных, уровень доступа и права доступа пользователей.

Под *семантической базой данных* в данной статье понимается некоторый RDF-граф G , состоящий из множества вершин P (множество субъектов и объектов) и множества ребер E (множество предикатов). В общем виде семантическая база данных может описываться следующим образом: $G=(P,E)$, где P – это вершины, используемые в качестве субъектов или объектов триплетов; E – это ребра, используемые в качестве предикатов триплетов (отношения между субъектами и объектами) [5].

Для описания прав пользователей семантической базы данных используются уровни доступа. Под **уровнем доступа** $R_{AB}(S, P, PS, C)$ понимается утверждение о том, как элемент A связан с элементом B с помощью бинарного отношения u . Для каждого уровня доступа R задается индекс безопасности $AC=(S, P, PS, C)$, состоящий из 4 показателей: *чувствительность* S задает уровень значимости или важности связи (предиката), а также её уязвимости перед несанкционированным лицом; *приватность* P задает права владельца на возможность передачи данной информации другим пользователям; *персональная безопасность* PS определяет уровень защиты персональной информации человека или организации; *конфиденциальность* C задает возможность использования данной информации с другими ресурсами.

Каждый показатель S, P, PS, C может принимать значения из **множества меток безопасности** $L=\{\text{неклассифицированный } (L_U), \text{конфиденциальный } (L_C), \text{секретный } (L_S) \text{ и сверхсекретный } (L_{TS})\}$, где $L_U < L_C < L_S < L_{TS}$. В рассматриваемой задаче контроля логических выводов предполагается, что эти показатели могут принимать только значение 0 (unclassified) или значение 1 (confidential).

Права доступа пользователей к данным также задаются с помощью 4 показателей: чувствительности, приватности, персональной безопасности и конфиденциальности и записываются как $AC_s=(S_s, P_s, PS_s, C_s)$.

Для пояснения работы метода контроля логических выводов удобно использовать два типа графов, описывающих связи между элементами графа семантической базы данных: видимый граф и логический граф. Для пользователя, имеющего уровень доступа AC_s , **видимым графом** является граф G_s , состоящий из триплетов, к элементам которых (субъекту, предикату и объекту) пользователь имеет доступ в соответствии с политикой безопасности. Таким образом, $G_s \subseteq G$. Под **логическим графом** G'_s понимается граф, получаемый путем применения основных логических правил и добавления полученных результатов к графу G_s . При этом $G'_s \subseteq G_s$.

Формальное описание задачи контроля логических выводов

При работе с семантическими базами данных пользователь имеет возможность с помощью SPARQL запросов получать наборы утверждений, доступ к которым ему разрешен, но из которых, с помощью логических выводов может быть получена информация, имеющая уровень безопасности, превышающий права доступа, назначенные данному пользователю. Это приводит к нарушению правила безопасности информации в семантической базе данных [6].

На множестве триплетов, получаемых из семантической базы, могут выполняться различные логические выводы. Если множество всех ресурсов (объектов или субъектов) обозначить как $P=\{A, B, C, \dots, Z\}$, а множество всех бинарных отношений обозначить как $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, где $n \geq 1$, тогда логические

выводы в семантической базе данных могут выполняться с использованием следующих основных правил:

- **симметричность**: если $X_i \in X$ является симметричным бинарным отношением, то для любых объектов $A, B \in P$ из триплета $A X_i B$ выводится триплет $B X_i A$;
- **транзитивность**: если $X_i \in X$ является транзитивным бинарным отношением, то для любых объектов $A, B, C \in P$ (которые не совпадают $A \neq B \neq C$) из триплетов $A X_i B$ и $B X_i C$ выводится триплет $A X_i C$;
- **импликация**: если бинарное отношение $X_i \in X$ включает в себе отношение $X_j \in X$, то для любых объектов $A, B \in P$ из триплета $A X_i B$ выводится триплет $A X_j B$;
- **корреляция**: если $X_i \in X$ является корреляционным бинарным отношением, то для любых не совпадающих объектов $A, B, C, D \in P$ (т. е. $A \neq C, B \neq D, A \neq D, B \neq C$) из триплетов $A X_i B$ и $C X_i D$ выводится триплет $A X_j C$;
- **декомпозиция**: если $X_i \in X$ является разложимым бинарным отношением, то для любых не совпадающих объектов $A, B \in P$ (т. е. $A \neq B$) из триплета $A X_i B$ выводятся два триплета $A X_i A$ и $B X_i B$.

В семантической базе данных для любого пользователя s , имеющего уровень доступа AC_s , **несанкционированным логическим выводом** является процесс добавления дополнительного ребра e к видимому графу G_s , где $e \in G \setminus G_s$. На основе этого можно сделать вывод о том, что доступ к семантической базе данных будет нарушаться только в случае, когда полученная связь между вершинами находится в невидимой части данных.

Таким образом, метод решения задачи обнаружения нарушений логических выводов заключается в поиске всех связей, находящихся в невидимой части графа $G \setminus G_s$.

Алгоритмы решения задачи

Для решения поставленной задачи разработаны три алгоритма, позволяющие находить нарушения прав доступа пользователей к семантическим данным.

Алгоритм 1: определение возможности получения логических выводов между двумя вершинами.

Введем понятие **потока информации** – для вершины A , под потоком информации $C(A)$ понимается множество всех ребер, непосредственно связанных с вершиной A . Предположим, что в графе G'_s вершины A и B имеют потоки информации $C(A)$ и $C(B)$, где $C(A), C(B) \subseteq G'_s$. Если $C(A) \cap C(B) = \emptyset$, то пользователь не может выполнять логические выводы с использованием данных вершин и их связей. На основе этого можно описать алгоритм определения возможности возникновения логических выводов из известных связей и вершин, показанный на рис. 2.

В соответствии с этим алгоритмом, если между вершинами A и B обнаружены связи, то пользователь может применять логические правила и полу-

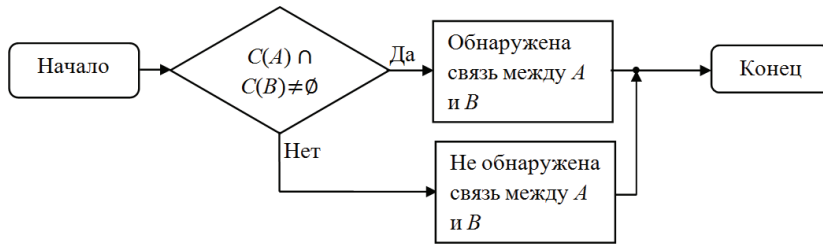


Рис. 2. Алгоритм определения возможности получения логических выводов из двух вершин

чать выводы. В противном случае, пользователь не может получить логических выводов из вершин A и B . Входными данными алгоритма 1 являются множества всех вершин и рёбер графа. Выходными данными являются вершины, между которыми имеется возможность выполнять логический вывод.

Алгоритм 2: определение возможности получения логических выводов между двумя вершинами A и B , имеющими разные максимальные уровни безопасности.

Предположим, что в графе G_s^i вершины A и B имеют потоки информации $C(A)$ и $C(B)$, где $C(A), C(B) \subseteq G_s^i$. Пусть $C(A)$ имеет максимальный уровень m , а $C(B)$ имеет максимальный уровень n , где $n \geq m$, пользователь имеет уровень доступа $AC_s = cl$ и не имеет доступа к какой-то части данных. Часть потока информации вершины A , содержащая только триплеты, уровни безопасности которых не больше, чем m , обозначается как $C_{0 \rightarrow m}(A)$.

Часть потока информации вершины B , содержащая только триплеты, уровни безопасности которых не больше, чем n , обозначается как $C_{0 \rightarrow n}(B)$. Булева переменная R используется для указания возможности связать вершины A и B . Если $R = true$, то вершины A и B могут быть связаны; а если $R = false$, то вершины A и B связать нельзя.

В зависимости от значения уровня доступа пользователя cl поиск общей связи информации между вершинами A и B выполняется в следующих случаях:

- Если $cl \leq m$, то осуществляется поиск общих связей между потоками информации $C_{0 \rightarrow cl}(A)$ и $C_{0 \rightarrow cl}(B)$.
- Если $cl \leq n$ и $cl \geq m$, то осуществляется поиск общих связей между потоками информации $C_{0 \rightarrow m}(A)$ и $C_{0 \rightarrow cl}(B)$.
- Если $cl \geq n$, то осуществляется поиск общих связей между потоками информации $C_{0 \rightarrow m}(A)$ и $C_{0 \rightarrow n}(B)$.

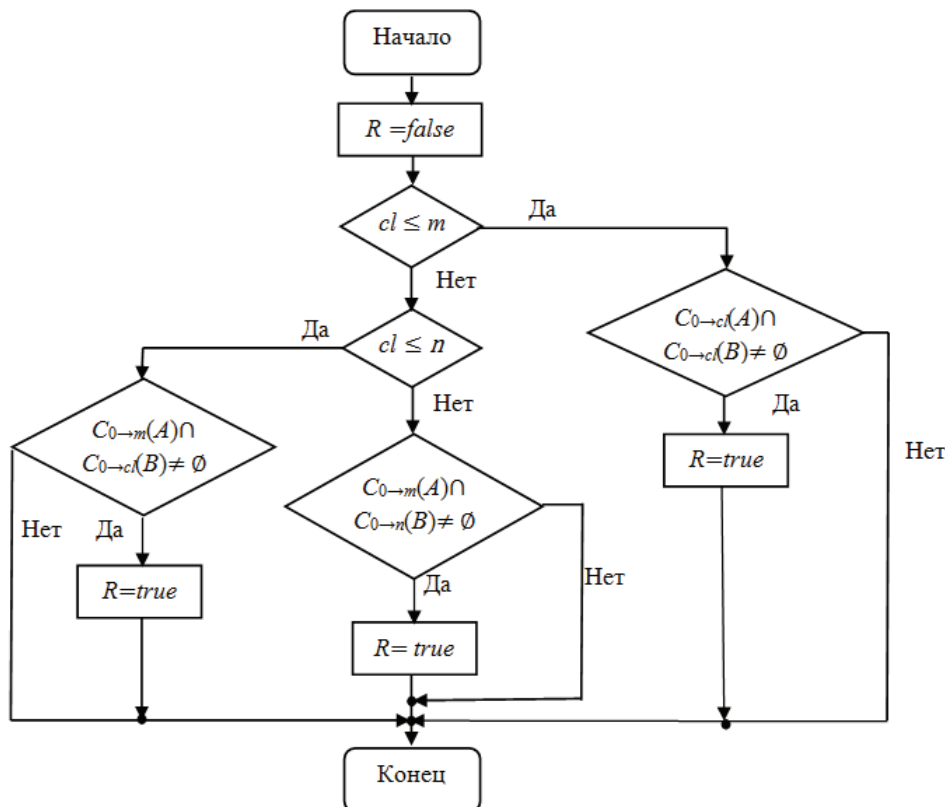


Рис. 3. Алгоритм определения возможности получения логических выводов из двух вершин, имеющих разные уровни права доступа

Тогда для определения возможности получения логических выводов между вершинами A и B может использоваться алгоритм, показанный на рис. 3.

Алгоритм 3: обнаружение нарушений логических выводов.

Обозначим множество всех связей, имеющих более высокие уровни безопасности, чем уровень доступа пользователя AC_s , как E_h , где $E_h = \{e_i; e_i \in G \setminus G_s, \text{ где } e_i \text{ является ребром}\}$, а множества всех раскрытых и безопасных связей, имеющих высокие уровни безопасности, обозначаются как E_d и E_{sa} , соответственно.

С учетом введенных обозначений, алгоритм обнаружения нарушения логических выводов может быть описан следующим образом:

Шаг 1: определение видимых пользователем частей графа.

Разделение всех связей на связи, у которых уровень меньше, чем уровень доступа пользователя и связи, у которых уровень больше, чем уровень доступа пользователя (такие связи будут помечаться) [7]. Таким образом, выполняется определение видимого графа G_s и множества связей, имеющих высокие уровни безопасности $E_h = \{e_i; e_i \in G \setminus G_s\}$.

Шаг 2: применение основных логических правил для получения логического графа G_s^l . Связи, полученные в результате логического вывода, которые находятся в невидимых частях графа, называются *раскрытыми связями*. Такие связи будут специальным образом помечаться. Остальные связи, не находящиеся в невидимых частях графа, называются *обычными связями*. Таким образом, выполняется определение и добавление раскрытых связей e_i к множеству E_d , где $e_i \in G_s^l \setminus G_s$.

Шаг 3: применение алгоритма 1 для помеченных вершин логического графа G_s^l . Если существует одна или несколько связей между двумя такими вершинами, то к ним возможно, с некоторой вероятностью [8], применять логические правила. Если между двумя вершинами невозможно получить вывод на более высоком уровне безопасности, то все связи между ними являются *безопасными*, в противном случае все связи между ними являются *подозреваемыми*; Таким образом выполняется определение и добавление безопасных связей e_i к множеству E_{sa} , где $e_i \in E_h \setminus E_d$.

Шаг 4: если найдены *подозреваемые связи*, то необходимо рассчитать вероятность их выполнения с использованием теории вероятностей. Выполнение таких логических выводов будем называть *вероятностным выводом*. Если вероятность такого логического вывода больше или равна *заданной вероятности p* (пороговому значению), то эти подозреваемые связи помечаются как *раскрытые связи*, в противном случае они помечаются как *безопасные связи*. Таким образом выполняется определение и добавление безопасных связей e_i и раскрытых связей e_j в E_{sa} и E_d путем сравнения вероятности логического вывода с заданным значением p , где e_i и $e_j \in E_h \setminus E_d \setminus E_{sa}$.

Пример применения разработанных алгоритмов для контроля логических выводов

Рассмотрим следующий пример: *пусть* имеется семантическая база данных, которая содержит множество триплетов со своими индексами безопасности $R = \{R^1_{AB}(0100), R^5_A(0110), R^9_{AB}(1100), R^8_{AB}(0000), R^9_{AE}(1111), R^1_{BE}(0000), R^2_{BC}(1110), R^3_{CB}(1100), R^6_{CB}(1100), R^7_{DC}(0110), R^{10}_D(1100), R^4_{DE}(1110)\}$. **Предположим**, что пользователь имеет уровень доступа $AC_s = (1100)$.

Требуется определить набор триплетов, которые пользователь может использовать для выполнения вывода данных, превышающих его уровень доступа AC_s .

На рис. 4 показан фрагмент RDF-графа.

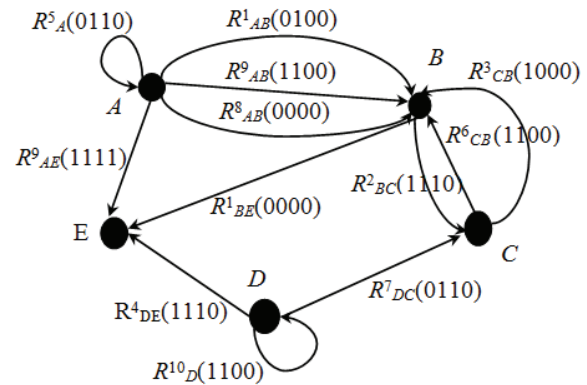


Рис. 4. Граф связей между элементами триплетов в базе данных

Используемые в данном графе отношения $\{X_1, X_2, \dots, X_{10}\}$ обладают следующими свойствами: X_1 является симметричной связью; X_3 – транзитивной связью; $\langle X_6, X_8 \rangle$ – доминирующее правило (в данной задаче $R^6_{CB} \rightarrow R^8_{BC}$); $\langle X_9, X_3 \rangle$ – левое доминирующее правило, т. е., если R_i и R_j левое доминирующее правило, то $xR_i y \rightarrow xR_j x$, $x \neq y$ (в данной задаче, $R^9_{AB} \rightarrow R^5_A$).

Для решения данной задачи безопасности семантической базы данных может быть применен алгоритм 3.

Шаг 1: определение видимых триплетов (граф G_s).

При выполнении прямой проверки прав доступа пользователям нельзя видеть триплеты $R^5_A(0110)$, $R^9_{AE}(1111)$, $R^4_{DE}(1110)$, $R^7_{DC}(0110)$, $R^2_{BC}(1110)$, так как их уровень доступа меньше, чем уровень безопасности триплетов. На рис. 5 показан видимый пользователю граф триплетов.

Шаг 2: определение логических и видимых триплетов (граф G_s^l).

В соответствии с заданными правилами R^9_{AB} доминирует над R^5_A и R^6_{CB} доминирует над R^8_{BC} , в результате получается логический граф, представленный на рис. 6.

Шаг 3: определение раскрытых, безопасных и подозреваемых триплетов.

Один из двух логических результатов R^5_A является нарушенным триплетом, потому что $R^5_A \in G \setminus G_s$. В результате будут получены: раскрытая связь R^5_A

и неясные связи $R_{AE}^9(1111)$, $R_{DE}^4(1110)$, $R_{DC}^7(0110)$, $R_{BC}^2(1110)$. Для контроля неясных связей необходимо проверить такие пары вершин, как $\langle A, E \rangle, \langle D, E \rangle, \langle D, C \rangle, \langle C, B \rangle$.

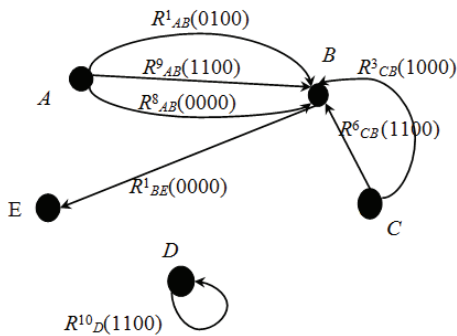


Рис. 5. Граф триплетов, видимых пользователю

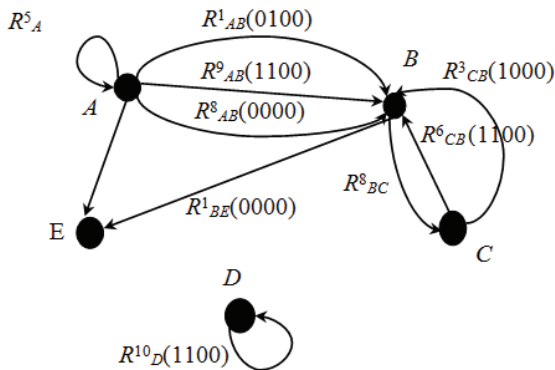


Рис. 6. Логический граф

Так как известно, что:

- $C(A) \cap C(E) \neq \emptyset$ (между вершинами A и E существует общая вершина B), значит, из них может следовать другой триплет;
- $C(D) \cap C(E) = \emptyset$, значит, из них не может следовать другой триплет;
- $C(D) \cap C(C) = \emptyset$, значит, из них не может следовать другой триплет;
- $C(B) \cap C(C) \neq \emptyset$, значит, из них может следовать другой триплет.

После этого шага получается множество нарушенных связей $\{R_A^3\}$, множество безопасных связей $\{R_{DE}^4(1110), R_{DC}^7(0110)\}$ и множество подозреваемых связей $\{R_{AE}^9(1111), R_{BC}^2(1110)\}$.

Шаг 4: проверка выводимых триплетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berners T. The Semantic Web // Scientific American. – 2001. – № 120. – P. 220–225.
2. Ford W. Security constraint processing in a distributed database management system // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 1995. – № 85. – P. 274–293.
3. Duchanrne B. Learning SPARQL. – California: Gravenstein Highway North, 2011. – 256 p.
4. Thuraisingham B. Secure Sematic Web Services. – Texas: Department of Computer Science, 2007. – 286 p.
5. Fensel D. Layering the semantic web: Problems and Directions // International semantic web Conference. – 2002. – № 74. – P. 476–485.

Вначале проверяется связь $R_{AE}^9(1111)$ между вершинами A и E : основными триплетами, не влияющими на подозреваемую связь $R_{AE}^9(1111)$, являются $\{R_{CB}^3, R_{CB}^6, R_{CB}^8, R_{D}^{10}\}$; основными триплетами, влияющими на подозреваемую связь $R_{AE}^9(1111)$, являются $\{R_{AB}^1, R_{AB}^9, R_{AB}^8, R_{BE}^1\}$.

Тогда можно определить цепочки логического вывода $\{R_{AB}^1, R_{BE}^1\}$, $\{R_{AB}^9, R_{BE}^1\}$, $\{R_{AB}^8, R_{BE}^1\}$. С их помощью пользователь, с некоторой вероятностью, может вывести триплет R_{AE}^9 .

Для того чтобы пользователь не смог вывести R_{AE}^9 , в этих парах не должен присутствовать один из элементов. В данном случае пользователю нельзя видеть триплет R_{BE}^1 или, по крайней мере, один из триплетов $\{R_{AB}^1, R_{AB}^9, R_{AB}^8\}$.

Теперь переходим к проверке связи R_{BC}^2 между вершинами B и C : связи $R_{AB}^1, R_{AB}^9, R_{AB}^8, R_{BE}^1$ и R_D^{10} не имеют отношений с R_{BC}^2 , а связи $R_{CB}^3, R_{CB}^6, R_{CB}^8$ имеют отношения с R_{BC}^2 . Из этих триплетов пользователь может вывести R_{BC}^2 с некоторой вероятностью. Для того чтобы пользователь не мог это сделать, ему должны быть невидимы триплеты $R_{CB}^3, R_{CB}^6, R_{CB}^8$.

Заключение

Задача обеспечения безопасности семантических баз данных является более сложной, чем обеспечение безопасности реляционных баз данных, для которых уже разработано большое количество методов. Сложность обеспечения безопасности семантических баз данных заключается в том, что на основе полученных из них данных могут быть выполнены логические выводы, позволяющие пользователям получать данные, которые им не разрешены. В связи с этим, при поддержке работы пользователей с такими базами данных необходимо контролировать логические выводы, которые могут быть выполнены на получаемых разрешенных результатах.

Данная задача решается путем использования выше описанных алгоритмов определения возможности получения логических выводов между двумя вершинами (имеющими одинаковые и разные максимальные уровни безопасности), а также алгоритма обнаружения нарушений логических выводов. Корректное использование разработанных алгоритмов при реализации системы доступа к семантической базе данных гарантирует защиту содержащейся в ней информации.

6. Thuraisingham B. Building Trustworthy Semantic Webs. – Texas: Department of Computer Science, 2008. – 434 p.
7. Morgenstern M. Controlling logical inference in multilevel database systems // Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy. – 1988. – № 74. – P. 245–255.
8. Dechter R. A unifying framework for probabilistic inference // Uncertainty in Artificial Intelligence. – 1996. – № 74. – P. 211–219.

Поступила 13.09.2012 г.

УДК 666.9:681.5

НЕЧЕТКАЯ ДИАГРАММА ПОВЕДЕНИЯ УЗЛА НАГРУЗКИ ГЛАВНОГО ПРИВОДА ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧИ

А.Г. Бажанов, В.Э. Магергут

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова

E-mail: all_exe@mail.ru

Описывается создание нечеткой диаграммы поведения узла приращения нагрузки на главный привод печи № 1 ЗАО «Осколцемент». Выбор данного узла был основан на его значительной роли в управлении всем объектом, что подтверждается не только мнением технологов и операторов печи, но и статистическими данными, полученными из базы данных завода. Для построения данной диаграммы были изначально использованы упрощенные модели балансов и динамики для уровня шлама в печи и ее момент инерции, которые можно получить исходя из структуры и технологии работы объекта. Диаграмма строится на основе данных математических моделей, учитывая зависимые для выбранного узла технологические величины, и описывает нечеткие связи между входными и выходными технологическими величинами объекта, что обусловлено сложностью его работы и управления.

Ключевые слова:

Цементная печь, система управления, нечеткая диаграмма поведения, узел приращения нагрузки, уравнения балансов.

Key words:

Wet rotary cement kiln, control system, fuzzy behavior chart, load increment node, equations of balances.

Важнейшую роль в производстве цемента по «мокрому» способу играет обжиг клинкера, который производится во вращающихся печах. Уровень автоматизации на существующих «мокрых» печах для обжига является низким, контроль за состоянием печи и ее управление ведется зачастую по устаревшим аналоговым приборам. Даже на печах с уже существующим техническим комплексом по автоматизации существенную роль в управлении играет человек, он принимает все решения, основываясь на показаниях приборов, выведенных на его автоматизированное рабочее место оператора (АРМ). Полное исключение человека из системы управления печью с применением традиционных методов автоматизации затруднено сложностью протекающих в печи физико-химических процессов и невозможностью построения математической модели этих процессов.

В связи с тем, что человеку сложно длительное время быть сконцентрированным на процессе управления и из-за усталости он может принимать ошибочные решения, возникает задача построения автоматизированной системы управления, полностью или частично повторяющей функции человека, созданной или обученной с участием операторов, управляющих вращающейся печью. Для создания такой системы необходимо иметь описание и анализ поведения технологических величин (узлов) цементной обжиговой печи.

В данной работе рассмотрено построение алгоритма функционирования узла приращения нагрузки на главный привод цементной печи № 1 ЗАО «Осколцемент» в виде так называемой нечеткой диаграммы поведения узла [1]. Алгоритм работы печи в целом и данного узла в частности на данный момент не существует в виде формализованной структуры, только лишь в виде регламентных правил на естественном языке, обращенных к машинисту печи с основанием функционирования на базе его личного опыта.

Диаграмма поведения [1] позволяет кроме описания объекта на базе имеющихся математических описаний балансов выявить неучтенные в объекте нештатные и аварийные ситуации вследствие своей замкнутости и возможности прохода по любой из дуг. Нечеткая диаграмма позволяет проводить аналогичный анализ для объектов с неформализованными алгоритмами, а также объектов с нечеткими правилами работы, что присутствует в рассматриваемом объекте.

Нагрузку на главный привод печи (N) – ток, протекающий через обмотки двигателя, примем как величину, зависящую от двух составляющих:

$$N = f(H_{ш}, J_0), \quad (1)$$

где $H_{ш}$ – уровень шлама в печи; J_0 – общий момент инерции, который складывается из момента инерции шлама ($J_{ш}$) и момента инерции самой печи (J_n). В силу того, что $J_n = \text{const}$, при переходе к уравнению динамики в приращениях получим, что $\Delta J_0 = \Delta J_{ш}$, где Δ – знак приращения.

Изменение уровня шлама в печи представим следующим уравнением:

$$S \frac{dH_{ш}}{dt} = Q_{ш} - Q_{к},$$

где S – площадь поверхности шлама, заполняющего печь; $Q_{ш}$ – подача шлама в печь; $Q_{к}$ – выход клинкера, причем можно принять, что

$$Q_{ш} = f(z_{ш}), \quad (2)$$

$$Q_{к} = f(V, H_{ш}, \alpha, \eta),$$

где $z_{ш}$ – степень открытия шиберы подачи шлама; V – скорость вращения печи; α – угол наклона печи; η – вязкость шлама. Так как $\alpha = \text{const} = 4\%$ к уровню горизонта, а η – коррелирована с $H_{ш}$, при переходе к уравнению динамики в приращениях примем, что

$$\Delta Q_{к} = f(\Delta V, \Delta H_{ш}). \quad (3)$$

С учетом принятых допущений изменение приращения общего момента инерции можно представить в виде следующей функциональной зависимости:

$$\frac{d\Delta J_o}{dt} = f(\Delta V, \Delta Q_{ш}, \Delta H_{ш}, \Delta Q_{к}, \Delta \eta, \Delta m_{ш}),$$

где $\Delta m_{ш}$ – приращение массы шлама в печи. В силу выражения (3) и взаимосвязи $m_{ш}, \eta$ с $H_{ш}$ получаем зависимость для ΔJ_o вида:

$$\frac{d\Delta J_o}{dt} = f(\Delta V, \Delta Q_{ш}, \Delta H_{ш}). \quad (4)$$

Таким образом, исходя из (2), (3), (4) и [1, 2] в вектор входных управляющих технологических величин будут входить: $\Delta V, \Delta Q_{ш}, \Delta H_{ш}$. К вектору управляющих воздействий будет относиться $z_{ш}$.

Тогда выражение (1) представим в виде:

$$\Delta N = f(\Delta V, \Delta Q_{ш}, \Delta H_{ш}). \quad (5)$$

Исходя из функциональной зависимости (5) составим структуру узла [1] приращения нагрузки на главный привод цементной печи (рис. 1) в виде зависимостей от входных приращений соответствующих величин:

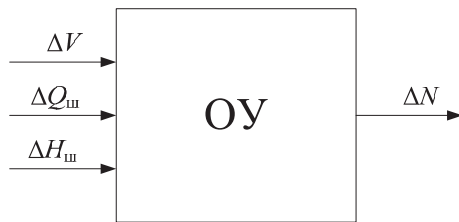


Рис. 1. Структура узла приращений нагрузки на главный привод печи

С целью составления нечеткой диаграммы поведения разделим входящие в структуру узла величины по нечетким градациям значений (при этом для упрощения записей знак Δ будем опускать):

- 1) скорость вращения печи V , которую определяет скорость двигателя z_d : z_d – привод остановлен, минимальная, низкая, средняя, $z_{d \max}$ – максимальная;
- 2) процент открытия шиберов шлама $z_{ш}$, который определяет подачу шлама в печь $Q_{ш}$: $z_{ш}$, приоткрыт, открыт больше h_{i-1} , открыт меньше h_{i-1} , открыт меньше максимума, $z_{ш \max}$ – максимальный;
- 3) высота шлама в печи: H_m – средняя, высокая, H_{\max} – максимальная;
- 4) нагрузка на двигатель: N_m – малая, N_{cp} – средняя, N_b – большая, N_{\max} – максимальная.

Далее составим технологическую структуру узла приращения N (рис. 2), для чего необходимо выполнить следующий комплекс действий:

1. Определить область изменения выходной координаты узла и выявить на ней характерные точки – в данном случае это нечеткие характеризующие правила.
2. Исходя из статистических данных и экспертных оценок, определить поведение узла на нечетких интервалах.

3. Выявить параметры, от которых зависит конкретный узел, то есть все потоки в объекте.
4. Построить схему по описанным правилам [1].
5. Записать управляющие и возмущающие ТУ узла, проставляя их над соответствующими связями.

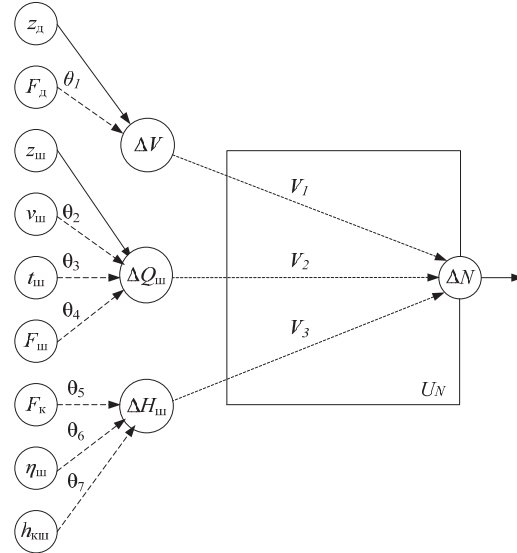


Рис. 2. Технологическая структура узла приращения N цементной печи

На рис. 2 используются следующие обозначения: $v_{ш}$ – влажность шлама; $v_{кр}$ – критическая влажность, при которой движение шлама невозможно; $\eta_{ш}$ – вязкость шлама в зонах декарбонизации, экзотермических реакций и начальной части зоны спекания; $\eta_{кр}$ – критическая вязкость, при которой возможно образование колец; $h_{кш}$ – высота шлама в основных зонах печи: декарбонизации, экзотермических реакций и начальной части зоны спекания; $h_{кр}$ – критическая высота, при которой возможно образование колец; $t_{ш}$ – температура шлама; $t_{ш3}$ – температура застывания; F_d – флаг исправности двигателя печи (1 – исправен, 0 – неисправен); F_k – флаг наличия кольца в печи (1 – есть, 0 – нет); $F_{ш}$ – флаг наличия шлама на входе в печь (1 – есть, 0 – нет). Индексами м, ср, б, тах обозначим соответствующие нечеткие градации величин – малый, средний, большой, максимальный.

Составим управляющие технологические условия, влияющие на узел нагрузки главного привода цементной печи:

$$\theta_1 = \begin{cases} 1 - \text{если привод печи исправен } (F_d), \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_2 = \begin{cases} 1 - \text{если } v_{ш} < v_{кр}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_3 = \begin{cases} 1 - \text{если } t_{ш} \geq t_{ш3}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_4 = \begin{cases} 1 - \text{если есть шлам } (F_{ш}), \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_5 = \begin{cases} 1 - \text{если есть кольца } (F_k), \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_6 = \begin{cases} 1 - \text{если } \eta_{ш} < \eta_{кр}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_7 = \begin{cases} 1 - \text{если } h_{кш} < h_{кр}, \\ 0 - \text{если иначе.} \end{cases}$$

а также возмущающие технологические условия:

$$V_1 = \begin{cases} \theta_{11} = \begin{cases} 1 - \text{если } V=0, \\ 0 - \text{если } 0 < V < V_m, \end{cases} \\ \theta_{12} = \begin{cases} 1 - \text{если } V=V_m, \\ 0 - \text{если } V_m < V < V_{cp}, \end{cases} \\ \theta_{13} = \begin{cases} 1 - \text{если } V=V_{cp}, \\ 0 - \text{если } V_{cp} < V < V_6, \end{cases} \\ \theta_{14} = \begin{cases} 1 - \text{если } V=V_6, \\ 0 - \text{если } V_6 < V < V_{max}, \end{cases} \\ \theta_{15} = \begin{cases} 1 - \text{если } V=V_{max}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases} \end{cases}$$

$$V_2 = \begin{cases} \theta_{21} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{ш} = 0, \\ 0 - \text{если } 0 < Q_{ш} < Q_m, \end{cases} \\ \theta_{22} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{ш} = Q_m, \\ 0 - \text{если } Q_m < Q_{ш} < Q_{cp}, \end{cases} \\ \theta_{23} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{ш} = Q_{cp}, \\ 0 - \text{если } Q_{cp} < Q_{ш} < Q_6, \end{cases} \\ \theta_{24} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{шл} = Q_6, \\ 0 - \text{если } Q_6 < Q_{ш} < Q_{max}, \end{cases} \\ \theta_{25} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{ш} = Q_{max}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases} \end{cases}$$

$$V_3 = \begin{cases} \theta_{31} = \begin{cases} 1 - \text{если } H_{ш} = H_m, \\ 0 - \text{если } H_m < H_{ш} < H_{cp}, \end{cases} \\ \theta_{32} = \begin{cases} 1 - \text{если } H_{ш} = H_{cp}, \\ 0 - \text{если } H_{cp} < H_{ш} < H_6, \end{cases} \\ \theta_{33} = \begin{cases} 1 - \text{если } H_{шл} = H_6, \\ 0 - \text{если } H_6 < H_{ш} < H_{max}, \end{cases} \\ \theta_{34} = \begin{cases} 1 - \text{если } H_{ш} = H_{max}, \\ 0 - \text{если иначе.} \end{cases} \end{cases}$$

С учетом технологической структурной схемы (рис. 2) и введенных ТУ была построена нечеткая диаграмма поведения узла N (рис. 3). В центре расположены вершины-прямоугольники с нечеткими статическими положениями для значений нагрузки на главный двигатель, по бокам – вершины-овалы, соответствующие динамике (слева – повы-

шение значений, справа – их снижение). Условия перехода между вершинами и сохранения статических состояний вершин, помечающие соответствующие дуги, обозначены как f_i . Они записываются в виде логических функций от ТУ и управляющих воздействий. При этом воспользуемся режимами 1-го ранга для обозначения состояний вершин.

Запишем переходы в виде нечетких правил:

$$Q_0 = \bar{\theta}_1 \vee \bar{\theta}_2 \vee \bar{\theta}_3 \vee \bar{\theta}_4 \vee \theta_{11};$$

$$Q_1 = \theta_6 \vee \theta_7;$$

$$f_{17} = \bar{Q}_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{11} \wedge (z_{ш} - \text{приоткрыт} \wedge \wedge (z_d - \text{минимальная скорость} \vee \vee z_d - \text{низкая скорость}));$$

$$f_2 = \bar{Q}_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{11} \wedge (z_{ш} - \text{приоткрыт} \wedge \wedge z_d - \text{минимальная скорость});$$

$$f_1 = \bar{Q}_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{12} \wedge ((z_{ш} - \text{открыт больше, чем } f_2 \wedge \wedge (z_d - \text{минимальная скорость} \vee \vee z_d - \text{низкая скорость}) \vee (z_{ш} - \text{приоткрыт} \wedge \wedge z_d - \text{низкая скорость}));$$

$$f_3 = f_5 = \bar{Q}_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{12} \wedge ((z_{ш} - \text{открыт больше, чем } f_1 \wedge z_d - \text{низкая скорость}) \vee (z_{ш} - \text{открыт как } f_4 \wedge z_d - \text{средняя скорость}));$$

$$f_4 = f_6 = \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{13} \wedge (z_{ш} - \text{открыт больше, чем } f_5 \wedge (z_d - \text{низкая скорость} \vee \vee z_d - \text{средняя скорость}) \vee$$

$$\vee z_{ш} - \text{открыт меньше максимума} \wedge \wedge (z_d - \text{низкая скорость} \vee \vee z_d - \text{минимальная скорость}));$$

$$f_8 = \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{13} \wedge (z_{ш} - \text{открыт меньше максимума} \wedge (z_d - \text{низкая скорость} \vee \vee z_d - \text{минимальная скорость}));$$

$$f_7 = \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{14} \wedge (z_{ш} - \text{открыт меньше максимума} \wedge (z_d - \text{максимальная}$$

$$\text{скорость} \vee \vee z_d - \text{средняя скорость}) \vee \vee z_{ш} - \text{открыт максимально} \wedge \wedge z_d - \text{низкая скорость});$$

$$f_9 = \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{14} \wedge (z_{ш} - \text{открыт максимально} \wedge \wedge z_d - \text{средняя скорость});$$

$$f_{10} = \bar{Q}_0 \wedge ((\theta_5 \vee \bar{Q}_1) \vee (\theta_5 \wedge \bar{Q}_1)) \wedge \theta_{15} \wedge \wedge (z_{ш} - \text{открыт максимально} \wedge \wedge z_d - \text{максимальная скорость});$$

$$f_{11} = Q_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{14} \vee z_{ш} - \text{открыт меньше максимума} \vee (z_{ш} - \text{открыт максимально} \wedge \wedge z_d - \text{средняя скорость});$$

$$f_{12} = Q_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{14} \vee$$

$$\vee z_{ш} - \text{открыт меньше максимума} \vee$$

$$\vee (z_d - \text{максимальная скорость} \vee \vee z_d - \text{средняя скорость}) \vee$$

$$\vee z_{ш} - \text{открыт максимально} \wedge \wedge z_d - \text{низкая скорость});$$

$$\begin{aligned}
 f_{13} &= f_{14} = Q_0 \wedge (Q_1 \vee \bar{\theta}_5) \wedge \theta_{13} \vee \\
 &\vee (z_{\text{ш}} - \text{открыт меньше } f_8 \wedge z_{\text{д}} - \text{низкая скорость}) \vee \\
 &\vee (z_{\text{ш}} - \text{открыт меньше максимума} \wedge \\
 &\wedge z_{\text{д}} - \text{средняя скорость}); \\
 f_{15} &= f_{16} = Q_0 \wedge \bar{Q}_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{12} \vee (z_{\text{ш}} - \text{открыт меньше } f_2 \wedge \\
 &\wedge z_{\text{д}} - \text{минимальная скорость}) \vee \\
 &\vee z_{\text{ш}} - \text{приоткрыт}; \\
 f_{17} &= \bar{Q}_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{12} \wedge (z_{\text{ш}} - \text{открыт больше, чем } f_{15} \wedge \\
 &\wedge (z_{\text{д}} - \text{минимальная скорость} \vee \\
 &\vee z_{\text{д}} - \text{низкая скорость})); \\
 f_{18} &= Q_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{12} \wedge z_{\text{ш}} - \text{открыт меньше, чем } f_1 \vee \\
 &\vee z_{\text{д}} - \text{низкая скорость} \vee \\
 &\vee z_{\text{д}} - \text{минимальная скорость}; \\
 f_{19} &= \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{12} \wedge (z_{\text{ш}} - \text{открыт больше } f_{13} \wedge \\
 &\wedge z_{\text{д}} - \text{минимальная скорость}); \\
 f_{20} &= Q_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \vee z_{\text{ш}} - \text{открыт меньше } f_4 \wedge \\
 &\wedge (z_{\text{д}} - \text{низкая скорость} \vee \\
 &\vee z_{\text{д}} - \text{минимальная скорость}); \\
 f_{21} &= \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge (z_{\text{ш}} - \text{открыт максимально} \vee \\
 &\vee z_{\text{д}} - \text{высокая скорость}); \\
 f_{22} &= f_{11}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, на основе рабочей базы данных ЗАО «Осколцемент» и уравнений балансов были получены функциональные зависимости, позволившие выявить вектор управляющих технологических величин для узла приращений N . Вследствие чего была достигнута основная цель работы – описан алгоритм функционирования узла приращений нагрузки главного привода цементной печи в виде нечеткой диаграммы поведения узла.

Результатом данной работы является построение нечеткой диаграммы поведения узла прира-

щения нагрузки на главный привод печи с возможностью построения разверток [1] нечеткой диаграммы поведения при различных режимах работы и последующим преобразованием их в помеченную сеть Петри, отражающую динамику объекта относительно узла. Проводя анализ сети, можно получить базу правил для нечеткого регулятора, который планируется внедрить в работу системы. Система управления на данном этапе планируется как советуемая с разработкой рекомендаций для оператора печи, позволяющих ему наиболее быстро и правильно реагировать на изменение характеристик печи, а также избегать ошибок в анализе ситуации.

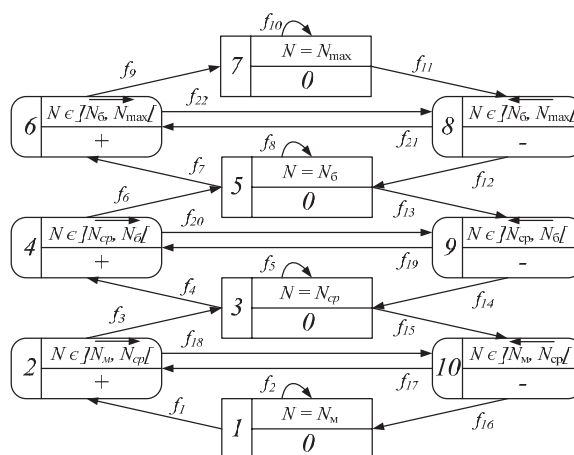


Рис. 3. Нечеткая диаграмма первого ранга поведения узла приращений N

Построенная нечеткая диаграмма поведения узла приращения нагрузки на главном приводе печи позволяет говорить о создании алгоритма управления цементной печью путем включения его в комплексную структуру автоматизированной системы управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магергут В.З., Юдицкий С.А., Перов В.Л. Построение логических моделей химико-технологических объектов (первичные и исходные модели). – М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1988. – 80 с.

2. Классен В.К. Обжиг цементного клинкера. – Красноярск: Стройиздат, 1994. – 323 с.

УДК 519.6

ИНДУКТИВНЫЙ МЕТОД САМООРГАНИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ ПРИКЛАДНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

К.Я. Синёва, В.С. Кичкильдинов*, В.Т. Калайда**, В.М. Белов***

Томский политехнический университет

*Отдел УМВД России по г. Томску

**Томский государственный университет

***Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск

E-mail: klarayakovlevna_@mail.ru

Разработан алгоритм восстановления, краткосрочного и долгосрочного прогнозирования для полей метеорологических величин с использованием идей индуктивного метода самоорганизации моделей на ЭВМ. Получены математические модели оптимальной сложности пространственно-временного краткосрочного и долгосрочного прогноза на небольшие периоды по времени, а также модели восстановления по высоте вертикальных профилей температуры в тропосфере по многолетним наблюдениям метеорологической станции Минск (53°11' с.ш., 27°32' в.д.)

Ключевые слова:

Метод группового учёта аргументов, самоорганизация прогнозирующих моделей, прикладная метеорология, статистика.

Key words:

Method of argument group account, self-organization of predictive models, applied meteorology, statistics.

Прогноз погоды относят к научным проблемам, которые пока ещё не получили точного решения, несмотря на объединённые усилия учёных и практиков всего мира. Проведён обзор отечественной и зарубежной литературы, представляющей анализ современных методов прогноза основных элементов погоды: температуры и осадков [1?3]. Цель работы: повышение точности восстановления и прогнозирования характеристик атмосферы путём разработки адаптивных методов и алгоритмов анализа и обработки метеорологических полей. Наиболее популярным и, вероятно, эффективным аппаратом является математическая статистика, особенно в случае прогноза погоды более чем на сутки. Однако в условиях сложных задач моделирования нужно синтезировать комбинированные подходы. В настоящей статье предложен комбинаторный полиномиальный алгоритм синтеза моделей восстановления, краткосрочного и долгосрочного прогнозирования для полей метеорологических величин. Проведён физико-статистический анализ вертикального профиля полей температуры в тропосфере с целью получения прогнозных и восстановительных математических моделей метеорологической величины для станции Минск.

Комбинаторный полиномиальный алгоритм синтеза моделей восстановления, краткосрочного и долгосрочного прогнозирования для метеорологических величин

Алгоритм индуктивного метода самоорганизации моделей можно представить в виде общей структурной схемы алгоритмов самоорганизации прогнозных моделей на рис. 1. Состоит из генератора моделей (ГМ), на выходе которого (в определённом порядке повышения сложности) получают варианты (претенденты) моделей и селективного устройства (К), выбирающего по заданному внешнему критерию самую лучшую модель

(В) [4, 5]. В зависимости от устройства генератора моделей-претендентов различают три основные структуры алгоритмов самоорганизации: комбинаторные, многорядные, многорядные пороговые.

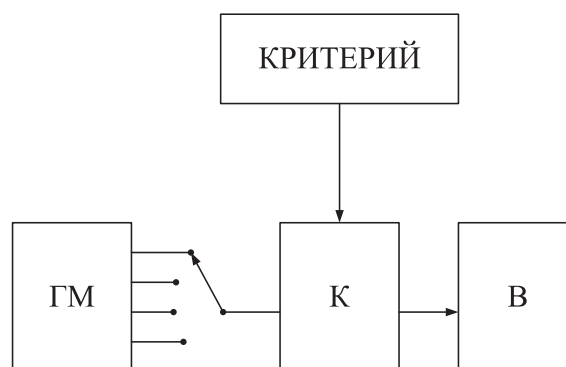


Рис. 1. Общая структурная схема алгоритмов самоорганизации моделей на ЭВМ

Комбинаторный алгоритм, представленный на рис. 2, соответствует генератору, который производит выбор модели из полного полинома приравниванием нулю («зануления») тех или других его слагаемых. Например, из полинома второй степени $y=a_0+a_1x+a_2x^2$ получаем три укороченных, частных полинома: $y=a_0+a_1x$; $y=a_0+a_2x^2$; $y=a_1x+a_2x^2$ и один полный полином. Происходит аналогичное «зануление» слагаемых для полинома третьей степени $y=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3$ и т. д.

Таким образом, получаем таблицу полиномов с постепенным усложнением структуры. Каждый из полиномов должен быть оценён по избранному критерию селекции. Полином с наилучшим значением критерия и является полиномиальной моделью оптимальной сложности. Производится пересчёт оценок коэффициентов модели по всем точкам таблицы опытных данных, рекомендуется, когда число слагаемых полного полинома не превы-

шает 20. При этом число сравниваемых моделей равно 2^{20} .

Критерий селекции достигает глубины своего минимума, если его значение становится равным $10^{-2}-10^{-5}$ [4]. Полином с первым наилучшим значением критерия и является полиномиальной моделью оптимальной сложности. Таблица исходных данных делится на две части, называемые обучающей (A) и проверочной последовательностями (B). При этом среднеквадратическая ошибка $\Delta(B)$, определяемая на проверочной последовательности, является одним из критериев для выбора структуры модели, синтезируемой по данным обучающей последовательности. Так создается первое внешнее дополнение. Таблицу исходных данных приходится делить на три части: обучающую, проверочную и две экзаменационные последовательности (A, B и C, D). Ошибка $\Delta(C)$, определяемая на экзаменационных данных, может служить вторым внешним дополнением, поэтому таблицу надо разделить так, чтобы $\Delta(C) \rightarrow \min$, требуется еще одно, третье, внешнее дополнение $\Delta(D) \rightarrow \min$ [3]. Мы приняли для критерия минимума смещения по формуле следующее разделение таблицы исходных данных:

$$N_A = 0,3; N_B = 0,3; N_C = 0,2; N_D = 0,2;$$

где N_A, N_B, N_C, N_D – число точек обучающей, проверочной, первой и второй экзаменационных последовательностей соответственно; N – общее число точек [5].

Целесообразно для определенности различать заблаговременность прогноза и прогностический период (срок его действия) как две самостоятельные характеристики [3–5]. Исследуется объект, описываемый параметрами $Y=(y_1, y_2, \dots, y_m)$, в моменты времени $t_j, j=1, m$, где $m-5, m-4, m-3, m-2, m-1, m$ – день. Например, объект удалось описать в терминах другого, более доступного во времени или в пространстве объекта $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, как функционал $Y=f(x)$ на множестве реализаций X . При этом характеристики объекта X (наблюдаемые или рассчитанные), как правило, тоже относят к различным моментам времени $t_x, i=1, n$. Такое исследование является прогностическим, если

$$\max_i t_{x_i} < \min_j t_{y_j}.$$

В противном случае экстраполяция во времени, а значит и прогноз отсутствует вообще. Далее условимся, что интервал времени $\tau = \min_j t_{y_j} - \max_i t_{x_i}$ – будем называть заблаговременностью прогноза, а момент времени $\max_i t_{x_i}$ – моментом прогноза, а интервал времени $\tau_y = \max_j t_{y_j} - \min_j t_{y_j}$ означает прогностический период или срок действия прогноза. Прогностические работы подразделяются следующим образом:

1) краткосрочный прогноз (τ, τ_y в пределах суток, что соответствует радиусу инерции большинства метеорологических объектов); 2) прогноз на малые

периоды (τ, τ_y в пределах радиуса корреляции метеорологических объектов, что в среднем составляет до 10 суток); 3) прогноз на большие периоды (τ, τ_y больше радиуса корреляции – месяц, сезон, год).

Внешние критерии, используемые в комбинаторном полиномиальном алгоритме синтеза моделей восстановления, краткосрочного и долгосрочного прогнозирования для полей метеорологических величин

Критерий минимума смещения, основанный на анализе решений

Модели, получаемые при использовании различных частей таблицы исходных данных, должны, по возможности, мало отличаться друг от друга, а при полном отсутствии смещения – совпадать. Выборка делится на две равные части. Модель на подвыборке A должна как можно меньше отличаться от модели на подвыборке B и наоборот по формуле:

$$n_{см}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_{A_i} - y_{B_i})^2}{\sum_{i=1}^N y_i^2},$$

где N – длина выборки; y_A, y_B – аппроксимация табличных данных на выборках A и B ; y_i – значения выходной величины.

Критерий баланса переменных и его применение для синтеза моделей

На интервале интерполяции устанавливается некоторая математическая связь между переменными, образующими систему. Критерий баланса требует, чтобы связь, называемая «законом», сохранялась на интервале прогноза. Если такой «закон» действительно существует и остается постоянным, то критерий баланса способен обеспечить достаточно точные долгосрочные прогнозы. Пусть $g_1(t), g_2(t), \dots, g_S(t) = 0$ – функция баланса – «закон», связывающий переменные $g_j(t), j=1, \dots, S$. Из множества всех прогнозирующих моделей для переменных $g_j(t)$ нужно выбрать такую систему, для которой на интервале экстраполяции (в районе точки прогноза) эта связь выполняется наилучшим образом. Нарушение баланса переменных характеризуют величинами небаланса $b_i = f(g_1(t_i), g_2(t_i), \dots, g_S(t_i))$, которые рассчитываются для t_i принадлежащих интервалу экстраполяции для каждой переменной $g_j(t)$. На интервале интерполяции строятся несмещенные законы: $g_1 = f_{1оп}(g_2, g_3, \dots, g_S)$; $g_2 = f_{2оп}(g_1, g_3, \dots, g_S)$; $g_S = f_{S оп}(g_1, g_2, \dots, g_{S-1})$. Причем, i -я обратная функция находится из j -й прямой ($i \neq j$). Величины $b_{1i} = (f_1 - f_{1оп})_i^2, b_{2i} = (f_2 - f_{2оп})_i^2, \dots, b_{Si} = (f_S - f_{S оп})_i^2$, рассчитанные на интервале экстраполяции по прогнозирующим моделям для каждой переменной, характеризуют небаланс системы прогнозов в точке. Критерий баланса по формуле

$$B = \sum_{j=1}^s \frac{\sum_i b_{ij}}{\sum_i f_i^2(t)}$$

используется для выбора оптимальной модели.

Комбинированный критерий селекции

Для гармонических и алгебраических моделей, использующих функции времени (среднесрочный и долгосрочный прогнозы), в случаях, когда известен или может быть открыт закон физического баланса переменных, рекомендуется критерий «несмещение плюс баланс переменных». При формировании комбинированного критерия приняты единичные веса для нормированных составляющих баланса и несмещенности по формуле:

$$K = \sqrt{\left(\frac{B}{B_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{n_{cm}^*}{n_{cm \max}^*}\right)^2},$$

где B, n_{cm}^* – небаланс и смещение для конкретной комбинации моделей системы; $B_{\max}, n_{cm \max}^*$ – их максимальные значения на множестве возможных комбинаций.

Краткосрочное и долгосрочное прогнозирование и восстановление по высоте вертикальных профилей температуры

С помощью разработанного комбинаторного полиномиального алгоритма синтеза моделей для восстановления, краткосрочного и долгосрочного прогнозирования полей метеорологических величин по методу группового учёта аргументов было принято решать задачи пространственно-временного прогнозирования и восстановления высотного распределения вертикальных профилей температуры по формуле на основе пространственно-временных наблюдений вида:

$$\{T_{h,t} \mid h = 0, 1, \dots, h_k; t = 1, \dots, N\},$$

где h – высота; h_k – максимальная высота наблюдений; t – время наблюдений; N – длина выборки. В качестве исходных данных принимали значения многолетних (1961–1978 гг.) радиозондовых измерений температуры $T, ^\circ\text{C}$ метеорологической станции Минск ($53^\circ 11' \text{ с.ш.}, 27^\circ 32' \text{ в.д.}$). Измерения метеорологических величин производятся по стандартным изобарическим поверхностям. В существующей практике радиозондовые наблюдения обычно проводятся в два срока (в 0 и 12 ч по Гринвичу), т. е. с интервалом в 12 ч. Наблюдения были интерполированы (метод линейной интерполяции) на сетку стандартных высот, являющуюся наиболее удобной и используемой для решения прикладных задач прогноза температуры, в тринадцати точках (0,0 (уровень земли); 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,0; 4,0; 5,0; 8,0 км).

Сетка стандартных высот позволяет описать с большим вертикальным разрешением почти всю тропосферу [1–3]. В качестве входных данных для

группы «обучения» (интервал интерполяции) приняли температуру по первым 10 суткам одного месяца из сезона (например, август 1975 г.). Вводим в программу 10 значений температуры (с 1 по 10 августа) на высотах 0,0...8,0 км. Данные аэрологических наблюдений взяты с временным интервалом в 24 ч., а для высот $h > 3$ км их целесообразно брать с интервалом в 12 ч. В качестве прогнозной функции задаём степенной полином 9 степени. Рекомендуем задавать степень полинома до 14, учитывая пространственно-временное распределение высотного вертикального профиля температуры в тропосфере. Прогноз делаем на следующие 10 суток (с 11 по 20 августа) соответственно по каждой стандартной высоте сетки. В результате программа выдает математические прогнозные модели, их коэффициенты, значения комбинированного критерия, смещения и баланса.

Прогноз делается по всей выборке – по 20 точкам. Модель оптимальной сложности, дающая объективный прогноз, выбирается по минимуму комбинированного внешнего критерия, его значение стало равным $K \leq 10^{-3}$. Комбинированный критерий выдает модель оптимальной сложности – полином третьей степени. Абсолютную погрешность определяют как разность $\Delta T = (T_{\phi} - T_{\text{пр}})$ – отклонение между фактическим и прогнозным значениями. В качестве допустимой средней абсолютной ошибки прогноза (погрешности) метеорологических величин примем величину менее $\pm 1,5 ^\circ\text{C}$ для краткосрочного и менее $\pm 2,5 ^\circ\text{C}$ – для долгосрочного прогнозов, что обычно используется в практике статистических прогнозов, восстановлений и допускается Всемирной метеорологической организацией для радиозондовых наблюдений [1–3].

Таблица 1. Модели оптимальной сложности для краткосрочного и долгосрочного пространственно-временного прогнозирования по времени 1–10 суток для температуры в тропосфере для станции Минск ($53^\circ 11' \text{ с.ш.}, 27^\circ 32' \text{ в.д.}$), август 1975 г.

$h, \text{ км}$	Модели Y для температуры $T, ^\circ\text{C}$	Критерий K	Абсолютная погрешность $T, ^\circ\text{C}$
0,0	$26,88 + 0,45X - 0,22X^2 + 0,40X^3$	$4,21 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2,35$
0,1	$23,58 + 0,70X - 0,22X^2 + 0,50X^3$	$4,15 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2,45$
0,2	$21,24 + 0,79X - 0,23X^2 + 0,40X^3$	$4,23 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2,60$
0,4	$16,58 + 0,98X - 0,24X^2 + 0,30X^3$	$4,41 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2,02$
0,8	$11,86 + 1,17X - 0,26X^2 + 0,20X^3$	$4,12 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1,48$
1,2	$7,16 + 1,58X - 0,29X^2 + 0,30X^3$	$5,02 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2,43$
1,6	$4,72 + 1,47X - 0,27X^2 + 0,21X^3$	$6,16 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2,94$
2,0	$2,73 + 1,29X - 0,25X^2 + 0,50X^3$	$6,95 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2,96$
2,4	$2,66 + 0,84X - 0,23X^2 + 0,70X^3$	$8,34 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2,03$
3,0	$-9,40 + 0,66X - 0,18X^2 + 0,60X^3$	$3,18 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2,47$
4,0	$-9,41 + 0,67X - 0,10X^2 + 0,80X^3$	$2,30 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3,78$
5,0	$-22,33 + 0,34X - 0,11X^2 + 0,40X^3$	$4,42 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2,97$
8,0	$-35,08 - 0,20X + 0,12X^2 - 0,30X^3$	$6,90 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3,58$

До высоты 3,0 км включительно мы имеем хорошие результаты прогнозирования. Здесь абсо-

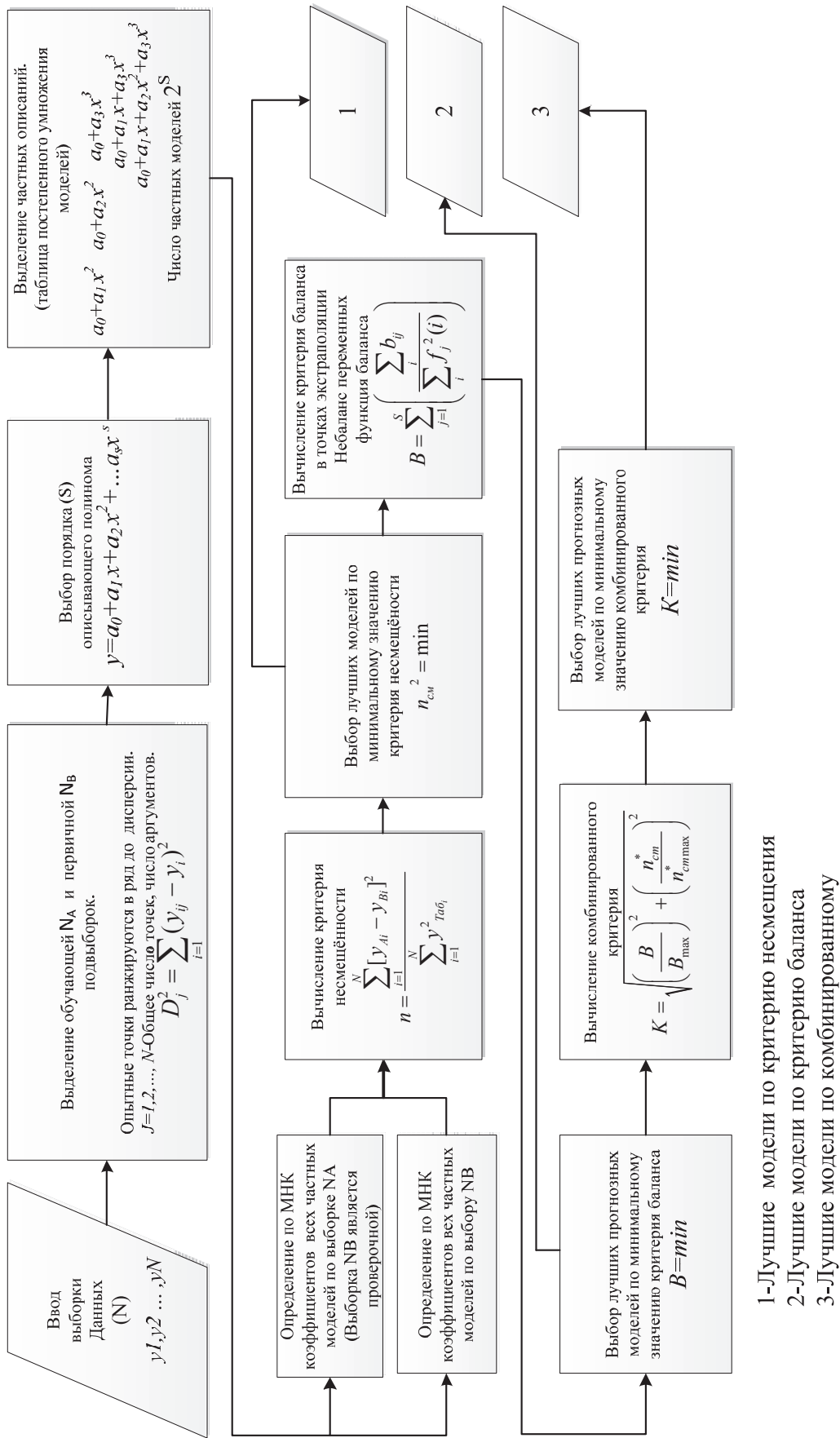


Рис. 2. Структурная схема комбинаторного полиномиального алгоритма синтеза моделей восстановления, краткосрочного и долгосрочного прогнозирования для метеорологических величин. МНК – метод наименьших квадратов

лютная погрешность прогноза ΔT не превышает величину $\pm 1,5^\circ\text{C}$ для прогноза 1–10 суток. Начиная с высоты 4,0...8,0 км, некоторые прогнозные значения превышают допустимую в практике статистических прогнозов величину абсолютной погрешности $\pm 1,5^\circ\text{C}$. На рис. 3 представлены прогнозные модели Y температуры и графики пространственно-временного прогноза температуры за период 10 дней соответственно своей высоте. Значения внешнего комбинированного критерия K , абсолютной погрешности прогнозирования на небольшие периоды температуры по времени для соответствующей модели Y представлены в табл. 1. Максимальное отклонение ΔT прогнозного значения от фактического (абсолютная погрешность) составило $\pm 3,58^\circ\text{C}$, минимальное составило $\pm 2,35^\circ\text{C}$. Для критериев селекции использовалась функция баланса, учитывающая высотное распределение вертикального профиля температуры по формуле:

$$f = g_2^2 + 6 \cdot g_2 + 6,4 \cdot g_1 - 3,8,$$

где g_1 – значения температуры по высоте 0,0...3,0 км по первым 10 точкам месяца, сезона, года; g_2 – по высоте 4,0...8,0 км по первым 10 точкам месяца, сезона, года.

Далее, используя те же данные, которые использовались при пространственно-временном прогнозе на небольшие периоды по времени 1–10 суток, решаем задачу восстановления по высоте вертикального профиля температуры соответственно своему прогнозируемому дню (τ , τ , в пределах су-

ток), т. е. решаем задачу восстановления на выше-лежащих уровнях по данным наблюдений на ниже-лежащих уровнях. Восстановление температуры осуществляется по стандартным высотам сетки (0,0 (уровень земли); 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 8,0 км) за каждые сутки из 10 дней месяца. На интервале интерполяции в качестве данных для группы «обучения» используются значения температуры, начиная с высоты 0,0...3,0 км. Интервал, где расположены точки, соответствующие температуре по высотам 4,0...8,0 км – интервал экстраполяции. Алгоритм выдаёт математические модели восстановления – решает задачу восстановления по высоте вертикальной структуры профиля температуры на всём интервале 0,0...8,0 км. Модель оптимальной сложности выбирается по первому минимуму внешнего комбинированного критерия селекции, равному $K \leq 10^{-3}$ – это алгебраический полином 3 степени. Модели восстановления по высоте вертикальных профилей температуры Y представлены соответственно своему дню (суткам) на рис. 4, а также значения внешнего комбинированного критерия K , абсолютные погрешности восстановления показаны в табл. 2. При восстановлении максимальное отклонение ΔT значения температуры от исходного (абсолютная погрешность) составило $\pm 1,38^\circ\text{C}$, минимальное составило $\pm 0,01^\circ\text{C}$.

На всем интервале восстановления (интерполяции и экстраполяции) абсолютная ошибка восстановления температуры в тропосфере не превышает принятое допустимое значение в практике статистических восстановлений $\pm 1,5^\circ\text{C}$ [1–3].

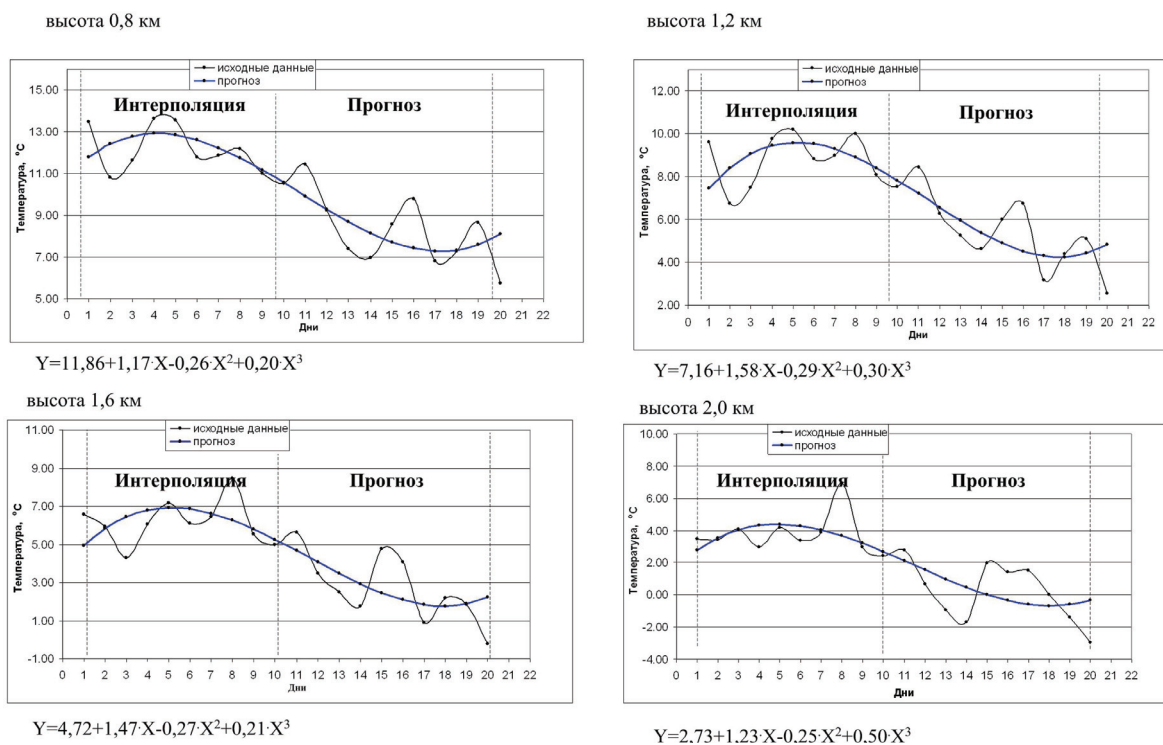


Рис. 3. Графики и модели пространственно-временного прогнозирования температуры по времени 1–10 суток в тропосфере по стандартным высотам сетки для станции Минск ($53^\circ 11'$ с.ш., $27^\circ 32'$ в.д.), август 1975 г.

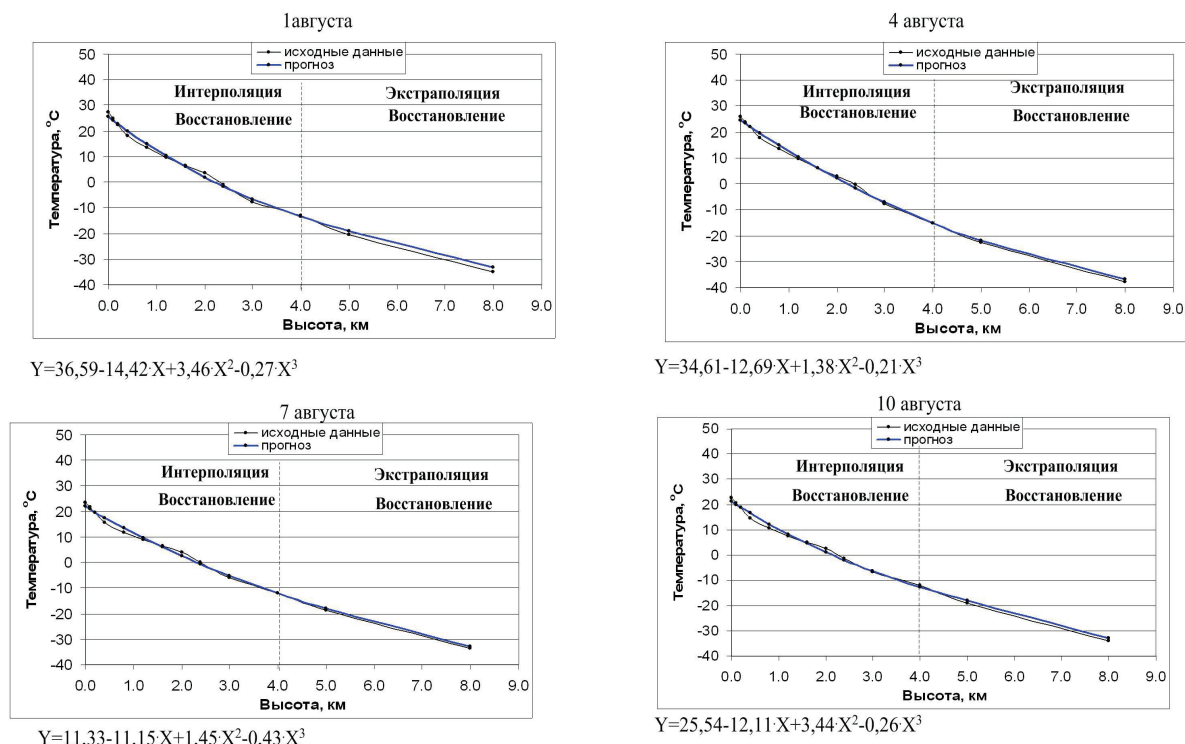


Рис. 4. Графики и модели восстановления вертикальных профилей температуры соответственно своему прогнозируемому дню по высоте в тропосфере для станции Минск (53°11' с.ш., 27°32' в.д.), август 1975 г.

Таблица 2. Модели оптимальной сложности восстановления вертикальных профилей температуры по высоте (0,0...8,0 км) для станции Минск (53°11' с.ш., 27°32' в.д.), август 1975 г.

№ суток	Модели У для температуры T, °C	Критерий K	Абсолютная погрешность ΔT, °C
1	$36,59-14,42X+3,46X^2-0,27X^3$	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,01$
2	$45,38-13,82X+1,83X^2-0,35X^3$	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1,13$
3	$14,83-12,42X+1,35X^2-0,33X^3$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,24$
4	$34,61-12,69X+1,38X^2-0,21X^3$	$3,13 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1,35$
5	$33,31-12,47X+1,45X^2-0,21X^3$	$2,09 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1,36$
6	$12,43-12,69X+3,25X^2-0,21X^3$	$3,11 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,78$
7	$11,33-11,15X+1,45X^2-0,43X^3$	$4,22 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1,45$
8	$39,08-10,86X+2,74X^2-0,12X^3$	$4,15 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,69$
9	$21,33-12,15X+2,21X^2-0,46X^3$	$5,13 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1,39$
10	$25,54-12,11X+3,44X^2-0,26X^3$	$4,23 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,98$

Выводы

Построены математические прогностические модели высотных профилей температуры, позво-

ляющие прогнозировать и восстанавливать изменения температуры в период времени 1–10 суток по сетке стандартных высот полей метеорологической величины температуры.

Абсолютная погрешность прогнозирования температуры по времени на высотах 0,0...3,0 км не превышает $\pm 2,5$ °C. На высоте 4,0...8,0 км максимальное отклонение некоторых прогнозных значений от исходных составило $\pm 3,58$ °C.

Абсолютная погрешность восстановления температуры на высотах 0,0...8,0 км не превышает на большинстве уровней допустимое в практике статистического восстановления и прогнозирования значение $\pm 1,5$ °C.

Разработанный алгоритм эффективен для решения задач прогнозирования и восстановления полей температуры в тропосфере, и его можно рекомендовать для определённого класса прикладных задач по метеорологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зуев В.Е., Комаров В.С. Метеорологические исследования в ИОА СО РАН в период с 1980–1999 гг. // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13. – № 1. – С. 18–30.
- Комаров В.С., Дубовик К.Ю., Попов Ю.Б., Лавриненко А.В. Пространственная интерполяция метеорологических полей с помощью малопараметрической динамико-стохастической модели с вертикальной компонентой // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 12. – С. 1075–1079.

- Комаров В.С. Статистика в приложении к задачам прикладной метеорологии. – Томск: Изд-во СО РАН, 1997. – 256 с.
- Ивахненко А.Г., Мюллер И. Самоорганизация прогнозных моделей. – Киев: Техніка, 1985. – 350 с.
- Справочник по типовым программам моделирования / под ред. А.Г. Ивахненко. – Киев: Техніка, 1980. – 182 с.

Поступила 29.06.2012 г.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОЕКТНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Е.И. Громаков, Т.В. Александрова, А.В. Лиепиньш, А.М. Малышенко

Томский политехнический университет

E-mail: gromakov@tpu.ru

Исследована возможность автоматизированного мониторинга руководством проектной организации результативности её текущей деятельности вплоть до отслеживания загрузки оборудования, используемого для тиражирования проектной документации. Проведенные макетные испытания возможностей предложенной системы мониторинга показателей подтверждают значительное повышение объективности и снижение трудоемкости периодической их оценки.

Ключевые слова:

Эффективность бизнеса, ключевые показатели эффективности, система сбалансированных показателей, мониторинг показателей эффективности.

Key words:

Business performance, performance key indicators, Balanced Scorecard, monitoring.

Введение

Современные информационные технологии (ИТ), применяемые для решения управленческих задач на предприятиях и в организациях, все больше ориентированы на использование автоматизированных систем управления предприятием (АСУП). Наряду с решением уже традиционных задач АСУП, ныне все чаще ставятся и решаются задачи оперативного мониторинга всех ключевых направлений деятельности предприятия (организации), оценки эффективности функционирования его подразделений и работников [1–4]. Успешное решение этих задач значительно расширяет руководству «область оперативного наблюдения» за деятельностью предприятия (организации), его структурных подразделений и позволяет создавать автоматизированные информационные системы для контроля и управления всей совокупностью бизнес-процессов, в том числе осуществлять:

- 1) оценку эффективности бизнес-процессов и использования ресурсов;
- 2) контроль и прогнозирование тенденций изменения ключевых показателей деятельности предприятия (организации);
- 3) оптимизацию бизнес-процессов;
- 4) своевременное увеличение мотивации работников.

В статье анализируются возможности и эффективность применения автоматизированных информационных систем для регулярного оценивания ключевых показателей деятельности проектной организации и измерения (оценки) оперативных показателей работы ее технологического подразделения с использованием предикатной логики.

Описание логико-вычислительных форм показателей деятельности

Мониторинг ключевых показателей бизнес-процессов в проектной организации, как правило, включает в себя:

- отслеживание текущих значений показателей проектной деятельности и степени достижения их плановых значений в контролируемые периоды времени;
- разносторонний анализ зависимости значений показателей результативности проектной деятельности, а также причин несоблюдения плановых заданий;
- анализ результативности бизнес-процессов и/или подразделений в соответствии с установленными параметрами выборки (например, по процессам заданного типа, по показателям заданной категории и т. п.).

Большая часть показателей деятельности проектной организации имеет сложную логико-вычислительную форму комплексных индикаторов. В частности, в некоторых проектных организациях нефтегазовой отрасли все показатели группируются в Balanced Scorecard (BSC-срезы): «Финансы», «Заказчики», «Внутренние процессы», «Обучение и развитие» [5].

Регулярная оценка достижения целей по BSC-перспективам позволяет определить текущие приоритеты целей организации относительно друг друга, и это служит основой для оперативного управления ее деятельностью.

Для оценки деятельности в BSC-проекции «Финансы», например, в ОАО «ТомскНИПИнефть» используются индикаторы:

- численность персонала;
- уровень зарплаты;
- объем работ (бюджет) по календарным планам;
- выработка и другие.

Так, финансовый комплексный показатель «Выполнение бизнес-плана» вычисляется ежемесячно в соответствии с выражением:

$$K = \left(\frac{K1 \cdot 0,25 + K2 \cdot 0,25 + K3 \cdot 0,25 + K4 \cdot 0,25}{K1} \right) \cdot 100 \%, \quad (*)$$

где $K1=M$, если $0 \leq \PhiЧ/ПЧ < k_{11}$; $K1=1$, если $k_{11} \leq \PhiЧ/ПЧ \leq 1$; $K1=C$, если $1 < \PhiЧ/ПЧ \leq k_{12}$; $K1=0$,

если $k_{12} < \Phi\text{Ч}/\text{ПЧ}$; $\Phi\text{Ч}$, ПЧ – соответственно, фактическая и плановая численность штатного персонала; $K2 = N \cdot (F - \text{ВФ}/\text{ВП}) + 1$, если $0 < (F - \text{ВФ}/\text{ВП}) \leq k_{21}$; $K2 = Q \cdot (F - \text{ВФ}/\text{ВП}) + 1$, если $k_{21} \leq (F - \text{ВФ}/\text{ВП}) \leq 0$; $K2 = 0$, если $k_{21} < (F - \text{ВФ}/\text{ВП}) < k_{22}$; $K2 = R \cdot (F - \text{ВФ}/\text{ВП}) + 4,5$, если $k_{22} \leq (F - \text{ВФ}/\text{ВП}) < k_{21}$; ВФ – выработка фактическая; ВП – выработка плановая; $K3 = -S \cdot \text{ФЗП}/\text{ЛЗП} + 3,5$, если $k_{31} \leq \text{ФЗП}/\text{ЛЗП} \leq 1$ ($\pm 1\%$); $K3 = -G \cdot \text{ФЗП}/\text{ЛЗП} + 6$, если $1 < \text{ФЗП}/\text{ЛЗП} \leq k_{32}$; $K3 = 0$, если $\text{ФЗП}/\text{ЛЗП} < k_{31}$ или $k_{32} < \text{ФЗП}/\text{ЛЗП}$; ФЗП , ЛЗП – соответственно, фактическая и плановая средняя зарплата персонала; $K4 = 1$, если $k_{41} \leq \text{ФВП}/\text{ЛЗП} \leq 1$; $K4 = L \cdot \text{ФВП}/\text{ЛЗП} - 3$, если $k_{42} \leq \text{ФВП}/\text{ЛЗП} < k_{41}$; $K4 = -L \cdot \text{ФВП}/\text{ЛЗП} + 6$, если $1 < \text{ФВП}/\text{ЛЗП} \leq k_{43}$; $K4 = 0$, если $k_{41} < \text{ФВП}/\text{ЛЗП}$ или $k_{42} > \text{ФВП}/\text{ЛЗП}$; ФВП – фактическое выполнение плана оцениваемого периода (месяца, квартала, года и т. п.); ЛЗП – плановое задание оцениваемого периода.

В комплексном показателе (*) M , N , S , F , Q , S , R , G , L , k_j ($i \in \{1,4\}$, $j \in \{1,3\}$) имеют установленные численные значения, отражающие такие производственные показатели организации как фактические собственные затраты и производственный персонал.

При расчёте выработки в течение года $K2$ рассчитывается, исходя из плановых объёмов работ по календарным планам, а в декабре (по итогам года) – исходя из плановых объёмов работ по бизнес-процессам.

При ежемесячном расчете первое слагаемое показателя $K4$ исключается, а весовые коэффициенты при $K1$, $K2$ и $K3$ увеличиваются, соответственно, на 0,01; 0,05 и 0,1.

Средняя заработная плата рассчитывается без учета мотивации по ключевым проектам.

Для оценки деятельности в проекции «Заказчик» используются следующие индикаторы:

- количество полученных положительных заключений работы организации из органов государственной экспертизы;
- соблюдение сроков проектных работ;
- рейтинг удовлетворённости заказчика;
- доля этапов от плана, сданных в срок;
- объём проектных работ.

Так, клиентский показатель «Рейтинг удовлетворённости Заказчика» измеряется ежемесячно в баллах по формуле:

$$K = \frac{\sum_i \text{ФУУЗ}_i \cdot \text{ОРЗ}_i}{\sum_i \text{ОРЗ}_i},$$

где ФУУЗ_i – фактический уровень удовлетворённости i -го Заказчика; ОРЗ_i – объём работ для i -го Заказчика. Для оценки этого показателя используются индикаторы анкетирования заказчиков работ по десятибалльной шкале. Анкетирование проводится по единым типовым анкетам.

При подведении итогов работ считается, что результативность работ равна 100 %, если $K \geq 7$ бал-

лов. А если $K < 7$, то результативность определяется как $K/7 \cdot 100\%$.

Для оценки деятельности в проекции «Внутренние процессы» используются следующие данные:

- число выполненных проектов,
- число выполненных корректирующих и предупреждающих мероприятий внутренних и внешних аудитов,
- количество мероприятий по рекламациям Заказчика,
- количество выполненных поручений головной Компании и др.

Для оценки деятельности в проекции «Обучение и развитие» используются индикаторы:

- количество работников, прошедших обучение или переобучение;
- количество уволенных работников из числа производственного персонала;
- индивидуальная оценка удовлетворённости работников;
- количество работников, участвовавших в оценке удовлетворённости.

Большая часть из комплексных показателей рассчитывается в соответствии с результатами мониторинга индикаторов деятельности отдельных подразделений.

При выполнении мониторинга показателей уделяется внимание не только финансовым и объёмным результатам деятельности, но и операционной эффективности внутренних процессов. Это обеспечивает своевременную идентификацию потенциальных проблем в бизнес-процессах и принятие соответствующих управленческих решений.

Принципиальным для мониторинга показателей в проектной организации является непрерывная проверка соответствия ее деятельности регламентным документам, в частности, требованиям системы менеджмента качества. Это поддерживает необходимый «тонус» внутренних бизнес-процессов организации.

При оценке показателей используются шкальные и мягкие измерения с заданными зонами неопределённости между оценками «планового» и «минимально приемлемого» показателя эффективности. Такие измерения включают в себя контекстные, порядковые, абсолютные, интегральные оценки, которые используют как шкалы отношений, так и шкалы разностей.

Мягкие измерения оценок не требуют информационного отслеживания всех операционных составляющих деятельности организации, и это снижает ресурсные и финансовые затраты на мониторинг показателей.

В рамках цикла управления и непрерывного совершенствования бизнес-процессов контролируются, в первую очередь, такие их параметры, как время выполнения, объёмные части бюджета, трудозатраты, стоимость работ, квалификация персонала. На основе анализа этих и других параметров

принимаются как решения о совершенствовании структуры процесса (количества и последовательности выполняемых операций, перераспределения полномочий участников, совершенствование ИТ-обеспечения процесса и т. д.), так и решения по перераспределению плановых объемов работ и ресурсов по процессам, по мотивированию исполнителей и т. п.

Оценка и выбор автоматизированной информационной системы для контроля за показателями деятельности проектных организаций

В последние два десятилетия в управлении предприятиями и организациями все большее применение находит сформулированная Gartner в 1990 г. организационная стратегия, предусматривающая интеграцию управления производством, трудовыми ресурсами, финансового менеджмента, получившая название **ERP** (*Enterprise Resource Planning, планирование ресурсов предприятия*) и ориентированная на непрерывную балансировку и оптимизацию всех ресурсов предприятия. Для ее реализации уже создано и успешно используется довольно большое число специализированных интегрированных пакетов прикладного программного обеспечения, обеспечивающих общую модель данных и процессов для всех сфер деятельности предприятия (организации). Предлагаемые на ИТ-рынке ERP-системы ориентированы ныне не только на крупные промышленные предприятия, но и на предприятия (организации) среднего и малого бизнеса, причем не только промышленного сектора.

Внедрение ERP-систем ныне признается необходимым условием успешности бизнеса во всех отраслях производства товаров и услуг. На внедрение ERP-стратегии и ERP-систем должны быть ориентированы и проектные организации. Во многих из них уже внедрены и успешно используются автоматизированные системы, обеспечивающие планирование и мониторинг продвижения проектов (программные средства типа MS Project и MS Excel). Для расчета финансовых показателей организации по выполнению стратегических целей получили широкое применение такие отечественные системы как 1С «Зарплата и кадры», «Бухгалтерия». Однако эти автоматизированные информационные системы не обеспечивают непрерывную балансировку и оптимизацию всех ресурсов предприятия, что составляет суть ERP-систем.

Накопительные регистры ERP-системы организации должны наполняться количественными индикаторами деятельности, охватывающими основные показатели учетного финансового и бухгалтерского управления. Во всех ее информационных системах используется согласованный план таблиц, характеризующий результативность и эффективность бизнес-процессов организации, с детализацией в виде вычислительных массивов индикаторов и аналитических отчетов. В дополнение

к ним для регулярного учета нефинансовых показателей деятельности используются «ручные» инструменты мониторинга, основанные на сборе сведений о выполняемых процессах в проекциях **Valanced Scorecard** уполномоченными на то в организации ответственными работниками.

В историческом плане в процессе применения такой технологии мониторинга показателей объема наблюдения в организации постоянно увеличивались и сейчас существующие объемы анализируемой отчетной информации об ее деятельности требуют применения специализированных инструментальных средств.

В качестве инструментов для обработки информации, хранящейся в информационных системах, в последние годы на рынке появился целый класс специализированных ИТ-решений, предназначенных для анализа больших объемов информации. Примерами подобных ИТ-решений являются, в частности: SAP Business Intelligence Platform, IBM WebSphere Business Modeler, CA ERWin Process Modeler, Plan Business Intelligent, ARIS Process Performance Manager.

Инструменты этого типа строят как модели отдельных бизнес-процессов, так и модели сквозных бизнес-процессов, которые «выкачивают» статистику о выполненных операциях из ERP-систем и затем подвергают результативность деятельности всестороннему анализу. Существенным недостатком таких систем является высокая стоимость программных средств мониторинга и довольно высокие требования к профессиональной подготовке пользователей. Вот почему для автоматизации мониторинга показателей деятельности предприятия или организации многие предпочитают использовать недорогие информационные системы типа Dashboard от таких известных поставщиков как KPI Soft (QPR), группы компаний Инталев (ИНТАЛЕВ: Корпоративный контроллинг), ПрофИТпроект (KPI MONITOR), Swift Reporting (Dashboards), Profit Metrics (Profit Metrics) и некоторых других. Эти системы просты для установки на порталные решения компании и позволяют оперативно оценивать показатели деятельности с использованием как логических, так и математических выражений. Сравнивая их между собой, необходимо отметить, что только информационные системы группы компаний Инталев, ПрофИТ-проект и KPI Soft глубоко русифицированы и интуитивно могут быть понятны любому работнику организации, имеющему опыт работы с компьютером.

Проводимые авторами статьи исследования направлены на выбор информационных систем для мониторинга показателей деятельности проектных организаций. В расчет принимались следующие характеристики:

- используемые в организации системное программное обеспечение и ERP-системы;
- потенциальная возможность многопользовательской работы в информационной системе;

- вычислительные возможности информационно-вычислительной системы;
- способы представления результатов, выявления причин отклонений;
- интерфейс и эргономичность;
- наличие документации и технической поддержки;
- требования к аппаратному и программному обеспечению;
- стоимость.

В результате сравнения функциональных и стоимостных характеристик пакетов QPR, Инталев, KPI MONITOR можно сделать заключение, что заявленные возможности у этих пакетов в демонстрационных Интернет-источниках примерно одинаковы. Однако качество работы с пакетами отличается. Так, информационная система Инталев хорошо настроена на работу с системой типа 1С и сложна при вычислении логико-арифметических выражений. Пакет KPI MONITOR требует дальнейшей доработки, причем период его коммерческого использования не велик. Авторы статьи пришли к заключению, что наиболее предпочтительным для проектных организаций по реализуемым функциям и с учетом оперативности технической поддержки является выбор пакета QPR [6]. Настройка и реконфигурирование этого пакета не требует специальных навыков от пользователей.

Для тестирования вычислительных возможностей QPR был осуществлен расчет финансового комплексного показателя «Выполнение бизнес-плана».

Для расчета показателя (*) были заданы диапазоны, граничные значения и фактические значения для каждой из составляющих, формирующих этот показатель.

Применение встроенной библиотеки вычислений в QPR позволило без затруднений сформировать необходимые расчетные вычисления сложных форм показателей.

Для оценки практических возможностей работы руководителей подразделений в реальном времени с приборным измерением показателей использования технологического оборудования было решено оценить возможности автоматизированного мониторинга деятельности отдела выпуска проектов (ОВП).

Испытания системы мониторинга показателей деятельности отдела выпуска проектов

Такие испытания проводились в отделе выпуска проектов (ОВП) ОАО «ТомскНИПИнефть». Руководителем ОВП контролируется выполнение плановых заданий следующих стратегических показателей организации: «Выполнение выпуска документации в срок и в полном объеме» и «Процент снижения претензий по качеству и срокам выпуска проектов».

Для QPR-обработки отчетной информации основные характеристики показателей деятельности ОВП были представлены в виде дерева в формате BSC-проекции. Корнем этого дерева является стратегический показатель организации. Для оценки деятельности были использованы комплексные показатели на основе производственных индикаторов и измерений технологических счетчиков копировально-множительного оборудования. Численные значения производственных индикаторов поступали «в ручном режиме» на экран руководителя с периодическим обновлением один раз в месяц. Для повышения результативности достижения стратегических показателей деятельности был использован индикатор мотивации работников ОВП – бонусная карта работника (рис. 1).

Бонусный показатель имел следующие слагаемые:

$$\text{БОНУС} = k_1 \cdot П1 + k_2 \cdot П2 + k_3 \cdot П3 + k_4 \cdot (1 - П4),$$

где П1 – объем работ (рассчитывается как отношение объема выполненных работ к запланированному объему); П2 – рабочее время (рассчитывается как отношение фактического рабочего времени к

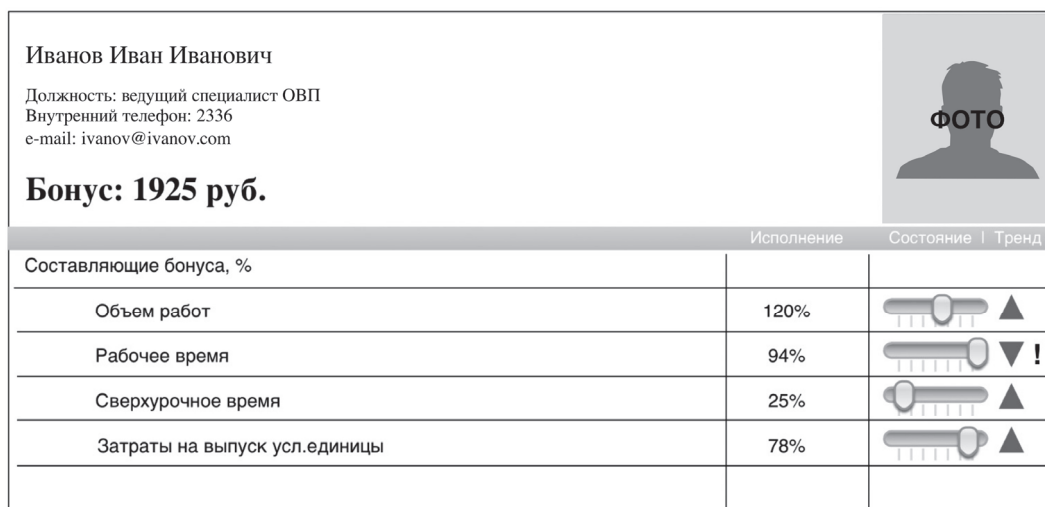


Рис. 1. Образец экранной формы бонусной карты

плановому); $P3$ – сверхурочное время отнесенное к рабочему; $P4$ – затраты на выпуск условной единицы продукции (рассчитывается как отношение фактических затрат к запланированным); k_1, k_2, k_3, k_4 – нормированные весовые коэффициенты, в рублях.

Для учета причинно-следственных отношений между стратегическим показателем организации и исходными производственными индикаторами деятельности отдела выпуска проектов были использованы следующие причинно-следственные отношения.

1. **Если** стимулирование соответствует мотивационному профилю работников (рассчитывается по формуле) & квалификационный состав работников сохраняется & обеспеченность расходными и иными материалами по объемам и срокам соответствует бюджету ОВП (данные берутся из информационной ERP-системы) & техническое обслуживание и ремонт выполняется согласно эксплуатационной документации (сроки обслуживания определяются техническими регламентами изготовителя оборудования) & сроки задания выпуска документации плановые ИЛИ нормативные (предлагается использовать нормативную трудоемкость подготовки условной страницы документ/проекта), **то** выполнение выпуска документации – выполнено в срок и в полном объеме.
2. **Если** стимулирование соответствует мотивационному профилю работников & квалификационный состав работников сохраняется & время наработки оборудования меньше заданного (% износа) & техническое обслуживание и ремонт выполняется согласно эксплуатационной документации & сроки задания выпуска документации плановые ИЛИ нормативные, **то** количество претензий к качеству будет минимальным.

3. **Если** стимулирование соответствует мотивационному профилю работников & квалификационный состав работников сохраняется & время наработки оборудования меньше заданного (% износа) & техническое обслуживание и ремонт выполняется согласно эксплуатационной документации & сроки задания выпуска документации плановые ИЛИ нормативные, **то** количество претензий по срокам будет минимальным.
4. **Если** стимулирование соответствует мотивационному профилю работников & время наработки оборудования меньше заданного (% износа) & квалификационный состав работников сохраняется & сроки задания выпуска документации плановые ИЛИ нормативные, **то** прямые и косвенные затраты будут плановыми.
5. **Если** модернизация оборудования плановая & время наработки оборудования меньше заданного (% износа) & техническое обслуживание и ремонт выполняется согласно эксплуатационной документации, **то** запас производительности оборудования будет гарантировать выполнение производственных программ.

В соответствии с причинно-следственными отношениями система показателей ОВП была построена в виде дерева QPR (выполнение выпуска документации в срок и в полном объеме, претензии по качеству и срокам, затраты на выпуск условной единицы документации).

Графическое представление показателя в макете информационной системы ОВП включало в себя: имя показателя, имя системы показателя, значение, текущий период, индикатор, иконку типа элемента, тренд, предупреждающий символ, а также ссылки на информационный элемент, шаг процесса и план действий.

Каждый показатель имел цветовой индикатор (рис. 2). Зеленый цвет индикатора означал, что

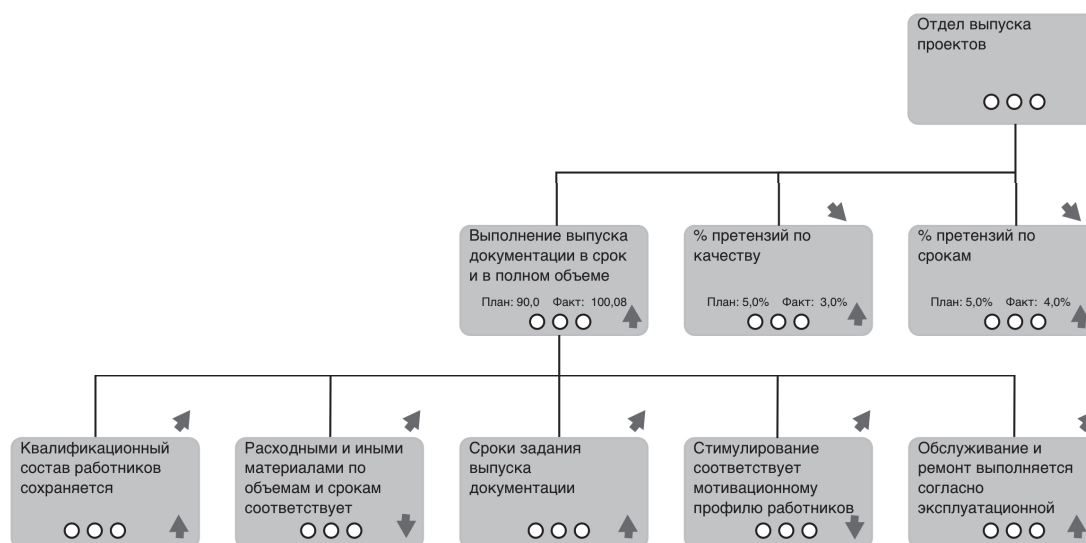


Рис. 2. Дерево цветных индикаторов

Отдел выпуска проектов	План	Факт	Состояние Тренд
Выполнение выпуска документации в срок и в полном объеме	100,8	90,0	○○○ ▲
% претензий по качеству	3,0%	5,0%	○○○ ▲
% претензий по срокам	4,0%	5,0%	○○○ ▲
Затраты на выпуск условной единицы документации	137,00 у.е.	150,00 у.е.	○○○ ▼
Прямые затраты	67,00 у.е.	75,00 у.е.	○○○ ▼
Косвенные затраты	70,00 у.е.	75,00 у.е.	○○○ ▼
Запас производительности оборудования		18,0%	○○○ ▼

Рис. 3. Экран эффективности работы отдела выпуска проектов

фактическое значение показателя за выбранный период достигло или превысило плановое значение. Желтый цвет означал, что фактическое значение показателя не достигло планового значения, но находится в допустимых пределах. Красный цвет индикатора означал, что фактическое значение показателя имеет значение менее допустимого, т. е. возникла критическая ситуация. Для усиления опасности события на графическом представлении критического показателя появлялся предупреждающий символ – восклицательный знак. Это использовалось для отслеживания критических ситуаций на нижних уровнях иерархии показателей, в частности, на уровне исполнителей, даже если показатель самого верхнего уровня имел допустимое значение.

Для оценки деятельности в целом отделе выпуска проектов были созданы оперативно наполняемые экраны эффективности работы (рис. 3).

Данные в макетном исполнении устанавливались вручную руководителем отдела, однако в последующем они могут загружаться автоматически из учетных систем.

Заключение

Ключевые показатели эффективности деятельности проектных организаций, в частности, в нефтегазовой отрасли, предполагают все более слож-

ные логико-арифметические вычисления. Благодаря современным программно-техническим средствам есть возможность оперативного автоматизированного мониторинга результативности текущей работы проектной организации вплоть до отслеживания производительности оборудования тиражирования проектной документации.

Испытания программно-технических средств контроля показателей деятельности проектной организации подтверждают значительное снижение трудоемкости регулярной оценки показателей и повышение их объективности.

Проведенные исследования возможностей оценки деятельности проектной организации с использованием «коробочного» информационного пакета QPR подтвердили целесообразность его использования для автоматизации мониторинга комплексных показателей деятельности (KPI) проектных организаций.

Установление и использование причинно-следственной логики описания показателей деятельности организации (предприятия) позволяет ее руководителю в автоматизированной системе легко «передвигаться» между различными логико-арифметическими уровнями сложных KPI от итоговых до детализированных значений и наблюдать их трендовые особенности в различные периоды наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников С.Н. Инструментарий бизнеса: современные методологии управления предприятием. – М.: Издательско-консультационная компания «Статус-Кво 97», 2001. – 336 с.
2. Информационные технологии в бизнесе. (Серия «Бизнес-класс») / под ред. М. Желены. – СПб.: Питер, 2002. – 1120 с.
3. Волошин М.В. Автоматизация управленческого и оперативного учета // Финансовый директор. – 2006. – № 11. – С. 34–39.
4. Ольве Н.-Г., Рой Ж., Веттер М. Оценка эффективности деятельности компании. Практическое руководство по использованию сбалансированной системы показателей / Пер. с англ. Э.В. Кондуковой, И.С. Половицы. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 304 с.
5. Каплан Р., Нортон Д. Организация, ориентированная на стратегию. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2009. – 416 с.
6. Система сбалансированных показателей (BSC). Системы качества. 2011. URL: http://www.qm-s.com/it_consulting/balanced_scorecard_bsc (дата обращения: 12.09.2012).

Поступила 14.09.2012 г.

УДК 681.324:519.17

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ФИНАНСОВЫХ СТРАТЕГИЙ НА КЛАСТЕРНОЙ СИСТЕМЕ

О.Г. Монахов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: monakhov@rav.sccc.ru

Описан подход к оптимизации финансовых стратегий (алгоритмов), основанный на индикаторах финансовых и товарных рынков и эволюционных вычислениях. Представлен параллельный генетический алгоритм, который был применен для автоматизации поиска оптимальных параметров торговых стратегий с точки зрения максимизации показателей доходности. Экспериментально с использованием кластерной системы и GPU-ускорителей показано, что предложенный алгоритм позволяет увеличить доходность финансовых стратегий и имеет отличную масштабируемость и ускорение при параллельных вычислениях на суперЭВМ с 53000 ядер.

Ключевые слова:

Параллельные вычисления, генетический алгоритм, финансовые стратегии, оптимизация, графические процессоры, биржевая торговля.

Key words:

Parallel computation, genetic algorithm, financial strategies, optimization, graphics processing units, trading.

Введение и постановка задачи

В практике биржевой торговли одним из основных направлений при выработке финансовых стратегий (торговых алгоритмов) является технический анализ ценовых рядов с помощью множества индикаторов [1–3]. В соответствии с принятой торговой стратегией, выраженной в виде набора правил, с поведением ценового ряда и значениями индикаторов инвестор принимает решение о совершении/не совершении сделки купли-продажи в данный момент времени. При совершении сделки инвестор руководствуется соображениями максимизации доходности и минимизации риска. Принятый набор правил, составляющий торговую стратегию, и используемые индикаторы имеют эмпирический характер, и значения их параметров определяются, в основном, опытным путем (методом проб и ошибок). Однако, как показывают эксперименты, такой подход с использованием известных правил и статически задаваемых параметров часто приводит к убыточным стратегиям. Использование высокопроизводительных вычислительных систем для торговли на бирже обозначается термином «высокочастотная» алгоритмическая торговля (high-frequency algorithmic trading) и позволяет компьютерным программам (торговым роботам) самостоятельно отслеживать данные по нескольким индексам на фондовых биржах, оптимизировать торговые стратегии и совершать миллионы сделок за максимально короткий промежуток времени.

В работе рассматривается проблема поиска параметров данной стратегии биржевой торговли S с целью оптимизации заданной целевой функции F , характеризующей ее качество. Будем считать, что цена на акцию представлена в виде ценового ряда $\{C_i\}$, $1 \leq i \leq N$, с заданной частотой (например, минутные или часовые цены), где C_i – цена закрытия в момент i . Пусть $r_{i+1} = C_{i+1} - C_i$. Важными инстру-

ментами технического анализа рынка акций являются скользящие средние, индикаторы и осцилляторы, на основе которых формируются множество торговых стратегий и которые помогают инвестору принимать решения о купле-продаже акций [1–3].

Пусть мы имеем индикатор технического анализа: $I_i^{(n)} = f(C_i, C_{i-1}, \dots, C_{i-n})$. Обобщенная торговая стратегия $S(I_i^{(n)})$, основанная на индикаторе $I_i^{(n)}$, определяется следующими соотношениями:

$$\varphi_{i+1} = \begin{cases} 1, & \text{если } I_i^{(n)} > \varepsilon_1, \\ \varphi_i, & \text{если } -\varepsilon_2 \leq I_i^{(n)} \leq \varepsilon_1, \\ -1, & \text{если } I_i^{(n)} < -\varepsilon_2. \end{cases}$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0$ – уровни значимого изменения индикатора $I_i^{(n)}$. Состояние покупки в данной торговой стратегии наступает при $\varphi_{i+1} = 1$, а состояние продажи наступает при $\varphi_{i+1} = -1$. Решение о сделке (купли/продаже) принимается при смене состояний: $\varphi_i \varphi_{i+1} = -1$.

Эта стратегия $S(I_i^{(n)})$ будет использована как темплейт (с некоторыми модификациями) для определения торговых стратегий на основе различных индикаторов технического анализа, и поиска оптимальных значений свободных параметров $(n, \varepsilon_1, \varepsilon_2)$, определяющих стратегию с наилучшими показателями доходности, будет осуществляться с помощью генетического алгоритма (ГА).

Например, одним из часто используемых индикаторов при анализе ценовых рядов является экспоненциальное скользящее среднее порядка k :

$$\bar{C}_{i+1}^{(k)} = \bar{C}_i^{(k)} + \frac{2}{k+1}(C_{i+1} - \bar{C}_i^{(k)}); \bar{C}_0^{(k)} = C_0, \quad 1 \leq i \leq N.$$

Порядок скользящего среднего k определяет степень сглаживания цены: чем больше k , тем сильнее сглаживание. Рассчитывается также разность экспоненциальных скользящих средних порядков $k_1 < k_2$: $r_{-i} = (\bar{C}_i^{(k_1)} - \bar{C}_i^{(k_2)}) / \bar{C}_i^{(k_2)}$.

Приведем пример простейшей торговой стратегии на основе экспоненциальных скользящих средних [2]. Задается уровень значимого изменения сглаженных цен $\varepsilon > 0$. Состояние покупки в данной торговой стратегии наступает при $\bar{r}_i > \varepsilon$, а состояние продажи наступает при $\bar{r}_i < -\varepsilon$. Решение о сделке (купли/продаже) принимается при смене состояний. Стратегия имеет три свободных параметра k_1, k_2, ε , изменение которых изменяет показатели доходности и риска торговой стратегии.

Поиск оптимальных стратегий (с наилучшими показателями доходности и/или риска) может осуществляться для каждого типа акций отдельно в динамике торговых сессий, с постоянной адаптацией к рыночной ситуации, или в квазидинамическом режиме, когда расчет оптимальных параметров происходит либо через заданные периоды времени, либо по выполнению определенных условий (например, по достижении заданного уровня потерь).

Пусть торговая стратегия S содержит параметры $P = \{p_n\}$, $n > 0$, описывающие значения целочисленных и действительных коэффициентов и переменных, значения индексов, параметры структур данных, константы и некоторые примитивные операции алгоритма (величины инкрементов и декрементов, знаки переменных, логические операции и отношения, типы округления переменных).

Целевая функция F оценивает величину доходности стратегии S , полученную при заданных значениях параметров $P = \{p_n\}$, $n > 0$ и при входных данных ценового ряда $\{C_{ij}: F_i = F_i(P, C_j), j \leq i, 1 \leq i \leq N\}$.

Таким образом, проблема оптимизации торговой стратегии состоит в следующем: для данной стратегии S и заданного набора значений ценового ряда $\{C_{ij}, 1 \leq i \leq N\}$, необходимо найти такие значения параметров P^* стратегии S , что $F_N(S(P^*, C_{ij})) \geq F_N(S(P, C_{ij}))$, для $1 \leq i \leq N$, при любых других значениях параметров $P \in \text{Dom}(P)$.

Целью данной работы является описание подхода к оптимизации торговых стратегий, основанного на эволюционных вычислениях, и его распараллеливанию на кластерной суперЭВМ с графическими (GPU – graphics processing unit) ускорителями. Представлен генетический алгоритм, который в процессе торговых сессий осуществляет автоматический поиск оптимальных параметров торговых стратегий и индикаторов с точки зрения максимизации показателей доходности. Для решения данной проблемы в работе предлагается подход, основанный на применении генетических алгоритмов [4, 5] с использованием предварительного знания прикладной области (множества индикаторов), выборе обобщенной схемы торговой стратегии, задаваемой в виде темплейта с параметрами [6], и ограничении пространства поиска оптимальных параметров.

Генетический алгоритм оптимизации стратегий

Генетический алгоритм основан на моделировании процесса естественного отбора в популяции особей, каждая из которых представлена точкой

в пространстве решений задачи оптимизации. Особи представлены структурами данных Gen – хромосомами, включающими свободные (неопределенные) параметры p_k торговой стратегии S : $Gen = \{P\} = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, $k > 0$. Эти параметры определяют необходимую торговую стратегию $S(Gen)$. Каждая популяция является множеством структур данных Gen и определяет множество стратегий $S(Gen)$.

Примем, что целевая функция (fitness function, функция качества, функция пригодности) F вычисляет суммарную доходность D_N , полученную в результате торговли в соответствии с данной стратегией S за N шагов для заданного ценового ряда $\{C_{ij}, 1 \leq i \leq N\}$:

$$F = D_N = \sum_{m=1}^{N_{br}} (d_m^{br} - Comm),$$

где $d_m^{br} = \frac{C_m^{sell} - C_m^{buy}}{C_m^{buy}}$; C_m^{sell} , C_m^{buy} – цены продажи и

покупки в m -той сделке; N_{br} – число сделок за N шагов моделирования; $Comm$ – размер постоянных комиссионных за каждую сделку. Целью алгоритма является поиск максимума F .

Основная идея генетического алгоритма состоит в эволюционном преобразовании множества хромосом (параметров стратегии) в процессе естественного отбора с целью выживания «сильнейшего». В нашем случае этими особями являются стратегии, имеющие наибольшее значение целевой функции. Алгоритм начинается с генерации начальной популяции. Все особи в этой популяции создаются случайно, затем отбираются наилучшие особи и запоминаются. Для создания популяции следующего поколения (следующей итерации) новые особи формируются с помощью генетических операторов селекции (отбора), мутации, кроссовера и добавления новых элементов (для сохранения разнообразия популяции).

Оператор *мутации* применяется к особям, случайно выбранным из текущей популяции с вероятностью $p_{mut} \in [0, 1]$. Мутация хромосомы Gen состоит в изменении значения случайно выбранного параметра p_k на другую, случайно выбранную величину из множества допустимых значений. Оператор *кроссовера* (*скрещивания*) применяется к двум особям (родителям), случайно выбранным из текущей популяции с вероятностью $p_{cross} \in [0, 1]$. Кроссовер состоит в порождении двух новых особей путем обмена частями хромосом родителей. Оператор создания *нового элемента* (особи) состоит в генерации случайных значений параметров p_k . Это позволяет увеличить степень разнообразия особей при создании популяции. Оператор *селекции* (*отбора*) реализует принцип выживания наиболее приспособленных особей. Он выбирает наилучших особей с минимальными значениями целевой функции F .

Для поиска оптимума заданной целевой функции F итерационный процесс вычислений в генетическом алгоритме организован следующим образом.

Первая итерация: порождение начальной популяции. Все особи популяции создаются с помощью оператора *новый элемент*, с проверкой и отсеиванием всех непригодных особей. После заполнения массива популяции лучшие особи отбираются и запоминаются в массиве *best*. *Промежуточная итерация:* шаг от текущей к следующей популяции. Основной шаг алгоритма состоит в создании нового поколения особей на основе массива *best*, используя операции селекции, мутации, кроссовера и добавления новых элементов. После оценки целевой функции для каждой особи в поколении проводится сравнение величин этих функций с величинами целевых функций тех особей, которые сохранены в массиве *best*. В том случае, если элемент из нового поколения лучше, чем элемент *best* [*i*], для некоторого *i* помещаем новый элемент на место *i* в массив *best* и сдвигаем в нем все остальные элементы на единицу вниз. Таким образом, лучшие элементы локализуются в верхней части массива *best*. *Последняя итерация (критерий останова):* итерации заканчиваются либо после исполнения заданного числа шагов, либо после нахождения оптимального значения целевой функции *F*.

Экспериментальные результаты

Предложенный генетический алгоритм с использованием темплейтов был успешно применен для адаптивной оптимизации торговых стратегий, основанных на следующих, наиболее популярных инструментах технического анализа: экспоненциальных скользящих средних (EMA – exponential moving average), индекса относительной силы (RSI – relative strength index), темпа изменения цены (ROC – price rate-of-change), момента (Momentum), метода схождения/расхождения скользящих средних (MACD – Moving Average Convergence/Divergence) [1–3].

Для экспериментов были рассмотрены ценовые ряды с минутными интервалами для акций ГАЗПРОМа (10000 точек), РАО ЕС России (10000 точек), NIKKEI (10000 точек), DJIA – Dow Jones Industrial Average (10000 точек), для периода с 16.04.2006 по 16.06.2006. Мы использовали первые 5000 точек для обучения и остальные точки – для тестирования.

Число итераций и размер популяции выбирались экспериментальным путем, основываясь на параметрах из [4, 5]. Значения основных параметров в экспериментах следующие: размер популяции – от 524288 до $105 \cdot 524288$, число итераций – 100, частота мутации – 0,15, частота кроссовера – 0,7, коммиссионные – 0,001.

Генетический алгоритм оптимизации торговых стратегий был реализован в системе эволюционно-синтеза алгоритмов на основе шаблонов (TES – template-based evolutionary synthesis) [6] на языке программирования C. Параллельная реализация ГА оптимизации стратегий биржевой торговли выполнена на основе распараллеливания по данным

[7–9], при этом, в отличие от аналогичных подходов [10], на графических процессорах исполнялись все части генетического алгоритма (и генетические операторы, и вычисление целевой функции), а не отдельные его элементы, что позволило на порядок увеличить ускорение. Так, результаты сравнения параллельной (на видеокарте NVIDIA GeForce 470 GTX 1280MB, 448 процессоров) и последовательной (на одном ядре процессора INTEL Core2Quad Q6700, 2.66 ГГц) реализации ГА для оптимизации стратегии показали ускорение времени выполнения алгоритма в 178 раз.

Параллельная реализация генетического алгоритма оптимизации стратегий биржевой торговли была выполнена в Сибирском Суперкомпьютерном Центре на кластерной суперЭВМ НКС-30Т с гибридной архитектурой (содержащей 40 вычислительных модулей, каждый из которых содержит 2 CPU Intel Xeon X5670 (по 6 ядер) и 3 графических ускорителя Tesla M 2090 (по 512 ядер), всего 480 ядер CPU и 61440 ядер GPU). Программа реализована в системе программирования CUDA [11] с использованием библиотеки MPI путем распараллеливания по данным с равномерным распределением популяции по потокам графической подсистемы. На каждом вычислительном модуле использовались 3 ядра CPU (3 потока MPI, по одному на каждую карту, для организации коммуникаций) и все 1536 ядер GPU – для вычислений. В конце итераций среди всех потоков выбирается лучшее решение, что минимизирует взаимодействия и позволяет получить отличное масштабирование и значительное (линейное) ускорение для параллельного алгоритма. Величина популяции составляла 524288 особей на каждой видеокарте (графическом ускорителе), использовались ценовые ряды в 10000 точек. Отметим, что в случае реализации генетического алгоритма на ГПУ, данные для обучения и тестирования следует по возможности помещать или в быструю разделяемую память или в константную память. Так, размещение этих данных в константной памяти, которую могут использовать все потоки сразу, позволило сократить время исполнения алгоритма на ГПУ почти в два раза.

В табл. 1 приведены результаты сравнения для параллельной реализации генетического алгоритма для оптимизации стратегии с MACD для акций ГАЗПРОМа при числе вычислительных модулей *M*, числе графических ускорителей *N*, числе ядер GPU *K*, размере популяции *Pop*, времени исполнения *T* (сек.) и полученном ускорении *S_p* по отношению к одному процессору GPU. Из табл. 1 видно, что при линейном возрастании объема вычислений (при линейном росте величины популяции) время исполнения остается постоянным (с отклонениями не более 1%), что свидетельствует об отличном масштабировании, высокой эффективности распараллеливания и линейном ускорении (превышающим два порядка) для параллельного генетического алгоритма.

Таблица 1. Сравнение параллельных реализаций генетического алгоритма

M	N	K	Pop	T (сек)	Sp
1	1	512	524288	785,45	1
1	3	1536	3*524288	779,4	3
5	15	7680	15*524288	781,24	15
10	30	15360	30*524288	784,17	30
15	45	23040	45*524288	787,78	45
20	60	30720	60*524288	785,42	60
25	75	38400	75*524288	784,96	75
30	90	46080	90*524288	784,47	90
35	105	53760	105*524288	784,62	105

Таблица 2. Увеличение суммарной доходности торговых стратегий

Тип акции \ Индикатор	EMA	MACD	RSI	ROC
	%			
ГАЗПРОМ	155	14,3	75	67,5
DJI	41	35,7	31	16,1

Используемый ГА позволил найти значения параметров торговых стратегий, обеспечивающие увеличение функции суммарной доходности (на 14...155 % для различных индикаторов, табл. 2) по сравнению с известными ранее [1, 3].

Заключение

Представленный подход к оптимизации торговых стратегий, основанный на индикаторах технического анализа, эволюционных вычислениях и темплейтах, был успешно применен для поиска свободных параметров стратегий с целью максимизации функции суммарной доходности. Параллельная реализация генетического алгоритма оптимизации стратегий биржевой торговли на гибридном кластере с графическими процессорами NVIDIA позволяет получить отличную масштабируемость для суперЭВМ с 53000 ядрами и существенное, превышающее два порядка, ускорение по сравнению с одним GPU-ускорителем, а также увеличить значения функции суммарной доходности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Achelis S.B. Technical analysis from A to Z. – Chicago: Probus, 1996. – 380 p.
2. Артемьев С.С., Якунин М.А. Математическое и статистическое моделирование на фондовых рынках. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2003. – 123 с.
3. LeBeau Ch.L., David W. Computer analysis of the futures market. – New-York: IRWIN, 1992. – 323 p.
4. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. – MA: Addison-Wesley, 1989. – 432 p.
5. Koza J. Genetic Programming. – Cambridge: The MIT Press, 1992. – 609 p.
6. Монахов О.Г. Эволюционный синтез алгоритмов на основе шаблонов // Автометрия. – 2006. – № 1. – С. 106–116.
7. Монахов О.Г., Монахова Э.А. Параллельные системы с распределенной памятью: структуры и организация взаимодействий. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 242 с.

8. Монахов О.Г. Параллельный генетический алгоритм для оптимизации торговых стратегий // Сиб. журн. вычисл. математики – 2008. – № 4. – С. 423–432.
9. Монахов О.Г. Параллельные генетические алгоритмы при поиске оптимальных финансовых стратегий на графических процессорах // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО-2010): Труды IV Междунар. конф. – Москва, 2010. – С. 212–224.
10. Tsutsui S., Fijimoto N. Solving Quadratic Assignment Problems by Genetic Algorithms with GPU Computation: A Case Study // In Proc. of Internat. Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2009). – Montreal Quebec, Canada, 2009. – P. 176–181.
11. NVIDIA CUDA Programming Guide. URL: <http://developer.nvidia.com/cuda/cuda-downloads> (дата обращения 10.08.2012).

Поступила 17.09.2012 г.

ПОСТРОЕНИЕ ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЦЕН

О.В. Медведко

Новосибирский государственный университет
ХК ОАО «НЭВЗ-Союз», г. Новосибирск
E-mail: o.medvedko@ngs.ru

Исследованы итерационные методы решения исходной задачи с использованием методов Монте-Карло и Бендерса. Построен итерационный метод для широкого класса распределений цен для случая, когда отсутствует информация о функции распределения, и имеется база статистических данных. Разработан итерационный метод для задач оптимального планирования производства в условиях неопределенности цен на товары. Полученные решения позволяют внедрять системы оптимального планирования на производственных предприятиях с учетом неопределенности цен на товары.

Ключевые слова:

Оптимальное планирование, стохастическое программирование, метод Монте-Карло, метод Бендерса.

Key words:

Optimal planning, stochastic programming, Monte-Carlo method, Benders method.

Постановка задачи

Рассмотрим динамическую модель планирования выпуска продукции в условиях неопределённости цен на товары, в которой при заданной норме риска возникает задача нахождения максимальной прибыли и оптимальной номенклатуры выпуска. Полагаем, что норма риска определяется вероятностью превышения прибылью заданного фиксированного значения.

Обозначим: $X_t = \{X_{kt}\}$ – вектор объемов выпуска продукции в момент времени t ; $Y_t^1 = \{Y_{kt}^1\}$ – вектор закупаемых ресурсов, полностью потребляемых в момент времени t (основные материалы, зарплата основных рабочих и т. д.); Z_{CONST} – сумма постоянных затрат в момент времени t ; $Y_t^2 = \{Y_{kt}^2\}$ – вектор покупаемых мощностей (станков, оборудования и помещений) в момент времени t ; A_t^1 – матрица удельных переменных затрат (нормы расхода основных материалов, зарплат основных рабочих на единицу изделия); A_t^2 – матрица удельных затрат производственных мощностей; K_t – сумма кредита, привлекаемого предприятием в момент времени t ; L_t – объем погашения задолженности в момент времени t ; β – процентная ставка за кредит; $C_t^{1,2} = \{C_{kt}^{1,2}\}$ – цены ресурсов; $\xi = \{\xi_{kt}\}$ – цены продаваемых продуктов, компоненты которых $\xi_{kt} \in P(c_{kt}, d_{kt})$ – независимые случайные величины, распределенные на компактных отрезках, характеризующие неопределённость цен на товары (будут рассматриваться также случайные величины, распределенные на компактных отрезках, за исключением множества меры «близкой» к нулю, также предполагается наличие плотностей распределения указанных случайных величин), где c_{kt}, d_{kt} – некоторые положительные константы (нижние и верхние границы возможных значений цен на товары); n – число производимых продуктов; $\varphi_0 > 0$ – начальный оборотный капитал.

Выпуск продукции теперь планируется при выполнении следующих групп ограничений.

1. Рыночные ограничения на объем выпуска записываются в виде:

$$l_t \leq X_t \leq r_t. \quad (1)$$

Отношение неравенства векторов надо понимать как покомпонентное неравенство. Детерминированные величины l_t и r_t – нижние и верхние границы спроса на продукцию, выпускаемую предприятием.

2. Технологические ограничения на затраты ресурсов имеют вид:

$$\sum_{i=1}^t A_i^1 X_t - \sum_{i=0}^t y_i^1 \leq 0, \quad (2)$$

а ограничения на использование мощностей формулируются следующим образом:

$$A_t^2 X_t - \sum_{i=0}^t y_i^2 \leq 0. \quad (3)$$

3. Вероятностное ограничение: для того, чтобы формализовать ограничения на финансирование выпуска, предположим, что задана величина $\alpha_0 \in [0, 1]$, измеряющая норму риска. Учитывая случайность цен ξ_i на продукцию, будем считать, что в каждый момент времени выполняется вероятностное ограничение:

$$P(\xi_t X_t - (C_t^1 Y_t^1 + C_t^2 Y_t^2) - Z_{\text{CONST}} \geq A_t) \geq 1 - \alpha_0, \quad (4)$$

где переменную величину A_t , удовлетворяющую при фиксированных X_t, Y_t^1, Y_t^2 ограничению (4), назовем точным допустимым гарантированным доходом (гарантированной прибылью) при заданной норме риска α_0 .

4. Финансовое ограничение: величины A_t, K_t, L_t и компоненты векторов Y_t^1 и Y_t^2 связаны также следующим финансовыми ограничениями:

$$\varphi_0 + \sum_{i=1}^{t-1} A_i + K_t - L_t - \beta \sum_{i=1}^{t-1} (K_i - L_i) - (C_t^1 Y_t^1 + C_t^2 Y_t^2) - Z_{\text{CONST}} \geq 0. \quad (5)$$

(Не можем истратить денежных средств больше, чем имеем).

Кредиты K_t равномерно ограничены некоторой константой K (K – максимальный кредитный лимит, представленный банком предприятию). (Не можем брать бесконечно большие кредиты, существует определенный лимит кредитной линии). Отметим также условие возвратности кредита:

$$\sum_{i=1}^T K_t = \sum_{i=1}^T L_i, \quad (6)$$

$$K_T = 0; \quad (7)$$

и естественное условие:

$$L_t \leq \sum_{i=1}^t K_i, \quad (8)$$

то есть, критерием построения производственной программы является функционал

$$\sum_{i=1}^T A_i \rightarrow MAX. \quad (9)$$

Предприятие, задаваясь гипотезой о возможном поведении рыночных цен на интервале времени $[0, \dots, T]$, выбирает оптимальную производственную программу и планирует ее реализацию с тем, чтобы на момент времени T интегральная гарантированная прибыль была максимальной. Рыночные, технологические и финансовые ограничения (1–3), (5–8) детерминированы, ограничение (4) – вероятностное. Поэтому мы имеем задачу динамического стохастического программирования.

Далее будем использовать более короткую запись модели. Пусть X – выпуклый (детерминированный) многогранник, отвечающий технологическим и финансовым ограничениям (1–3), (5–8). Тогда имеем следующую задачу стохастического программирования:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^T A_i \rightarrow MAX; \\ \{X_t, Y_t, K_t, L_t, A_t\} \in X; \\ P(\xi_t X_t - (C_t^1 Y_t^1 + C_t^2 Y_t^2) - 3_{\text{CONST}} \geq A_t) \geq 1 - \alpha_0; \\ t = 1, \dots, T. \end{cases}$$

Исходная проблема представляет собой задачу оптимизации линейного функционала на пересечении линейного многогранника и множества, полученного пересечением n вероятностных ограничений. Задача осложняется нелинейной структурой ограничений, трудностью расчета значений функции вероятности, зависящей от искомым параметров (4), не говоря уже о значениях ее производных, большой стохастической нагрузкой при увеличении количества продуктов. Как уже говорилось выше, на сегодняшний день для подобного рода задач не найдены универсальные методы решения.

Введение

Для решения задач планирования, проектирования и управления в экономике и технике требу-

ется исходная информация об обстановке, в которой будет выполняться план и будет осуществляться проектирование. Зачастую, особенно в последние годы, в нашей стране в условиях реформирования экономики, параметры рынка (цена, спрос, предложение и т. д.) не всегда можно зафиксировать или определить их статистические закономерности. Работа автоматических устройств в технике сопровождается непредвиденными случайными помехами. Таким образом, в моделях математического программирования, к исследованию которых сводятся задачи планирования, проектирования и управления, некоторые или все параметры показателя качества или ограничений могут оказаться неопределенными или случайными. Заметим, что для детерминированной постановки этих задач [1, 2] разработаны эффективные алгоритмы решения – метод последовательного улучшения плана [3, 4], симплекс-метод [5], а также, двойственный метод последовательного улучшения [6].

Рассмотрим задачу линейного программирования, в схему которой, как известно, укладывается большинство экономических и технических задач [1–6].

В векторной записи:

$$\begin{cases} (C, X) \rightarrow MIN; \\ AX - B \leq 0; \\ X \geq 0, \end{cases}$$

где A – матрица; B – вектор ограничений и C – вектор коэффициентов целевой функции соответствующих размерностей.

К моделям стохастического программирования приводят не только ситуации, связанные с риском или неопределенностью. Анализ сложных детерминированных задач, требующих чрезмерно большого перебора вариантов, иногда целесообразно сводить к исследованию некоторых стохастических задач.

Термин «стохастическое программирование» появился в начале 50-х гг. прошлого века, когда Дж. Данцингом, А. Чарнсом, В. В. Купером стали анализироваться задачи линейного программирования со случайными коэффициентами, возникающими при планировании в ситуациях с неопределенностью и риском [7, 8]. Известные методы решения задач нелинейного программирования [9, 10], как правило, неприменимы для решения сложных задач стохастического программирования, так как в таких задачах функции ограничений и цели имеют негладкий характер, неизвестны точные значения производных и самих функций.

К теме анализа задач линейного программирования со случайными данными обращался Н.В. Солдатов, в его работах [11] можно найти рассмотрение интересного частного случая для равномерных распределений. В других работах [9, 10] в некоторых случаях известны численные методы оценок оптимальных решений задач стохастического программирования, иногда данные задачи

удается свести к детерминированным аналогам, для которых разработаны эффективные алгоритмы решения. В работах Ю.М. Ермольева и А.И. Ястремского, Д. Б. Юдина предлагаются различные методы решения задач стохастического программирования [12–14], основная идея которых состоит в использовании вместо точных значений градиентов или их аналогов случайных направлений – стохастических квазиградиентов, являющихся статистическими оценками этих векторов, согласно работам Л.А. Растригина, Н. Роббинса, С. Монро [15, 16].

Итерационный метод на основе методов Монте-Карло и Е.Ф. Бендерса

Задача оптимального планирования производства в условиях стохастичности была рассмотрена многими авторами при различных распределениях цен на выпускаемые товары, разработан итерационный алгоритм поиска оптимального решения исходной задачи – метод стохастических квазиградиентов [12–14], в котором требуется знание точных значений функции распределения и необобщенного градиента, что на практике делает задачу трудно решаемой. Как правило, на практике существует лишь массив статистических данных случайной величины, поэтому предлагаемый метод, построенный на компиляции метода Монте-Карло и метода Бендерса, позволяет решать исходную задачу в общем случае, не имея точных значений функции распределения.

Предлагаемый универсальный алгоритм поиска оптимального решения большого класса распределений на цены производимых товаров при определенных допущениях и в случае имеющихся статистических данных рассмотрим ниже.

Имеем следующую исходную модель:

$$\begin{cases} A \rightarrow MAX \\ \{X, Y, K, L\} \in X \\ P(\xi X - (C^1 Y^1 + C^2 Y^2) - 3_{CONST} \geq A) \geq 1 - \alpha_0. \end{cases}$$

Воспользуемся приемом, используемым в методе Монте-Карло:

$$\begin{aligned} m &= P(\xi X - (C^1 Y^1 + C^2 Y^2) - 3_{CONST} \geq A) = \\ &= M\chi(\xi X - (C^1 Y^1 + C^2 Y^2) - 3_{CONST} \geq A), \\ \chi(\xi X - (C^1 Y^1 + C^2 Y^2) - 3_{CONST} \geq A) &= \\ &= \begin{cases} 1, \xi X - (C^1 Y^1 + C^2 Y^2) - 3_{CONST} \geq A \\ 0, \xi X - (C^1 Y^1 + C^2 Y^2) - 3_{CONST} < A \end{cases} \end{aligned}$$

По правилу «трех сигм» (следствие центральной предельной теоремы детальным образом рассмотрено в [17]) имеем следующее: пусть реализацией случайного вектора цен на производимые товары будет $\eta_i = \xi_i X - (C^1 Y^1 + C^2 Y^2) - 3_{CONST} - A$, тогда

$$P\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi(\eta_i \geq 0) - m \leq \frac{3b}{\sqrt{N}}\right) \approx 0,997,$$

где

$$b = \sqrt{M(\chi - M\chi)^2} \leq 1.$$

Отсюда P -неравенство с заданной степенью точности можно равномерно (поскольку b не зависит от переменных X, Y, A) аппроксимировать двумя линейными неравенствами, множество решений которых близко (с вероятностью 0,99) к допустимым решениям исходного P -неравенства. Имеем:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi(\eta_i \geq 0) \pm \frac{3}{\sqrt{N}} \geq 1 - \alpha_0,$$

где характеристическая функция полупространства i -й реализации случайного вектора цен ξ зависит от X, Y, A . Итак, получили две задачи, область допустимых решений которых покрывают («зажимают» по включению) по вероятности область допустимых решений исходной задачи. Фактически мы делаем одно допущение, заменяя левую часть P -неравенства на близкое по значениям выражение.

Для фиксированных N реализаций случайных векторов цен на производимые товары ξ_i

$$(A_+) \begin{cases} A \rightarrow MAX \\ \{X, Y, K, L\} \in X \\ \xi_i X - (C^1 Y^1 + C^2 Y^2) - 3_{CONST} - A \geq 0 \\ i = 1, \dots, N \\ K = \left[\left(1 - \alpha_0 \pm \frac{3}{2\sqrt{N}} \right) N \right]. \end{cases}$$

Итак, последняя задача упрощается и для неё можно найти алгоритмы решения. Полученная задача может быть приведена к частично целочисленной задаче линейного программирования, для которой применима теория алгоритмов [18–20]. Данные задачи в общем случае являются NP -трудными, но их удается решить достаточно быстро с помощью метода Бендерса, для которого мы построим «основную» и «вспомогательную» задачи-итерации поиска решения. Сначала удостоверимся, что полученную задачу можно свести к задаче частично целочисленного программирования: пусть l_i – нижние границы для $\xi_i X - (C^1 Y^1 + C^2 Y^2) - 3_{CONST} - A$ на X . Тогда следующая задача эквивалентна исходной:

$$\begin{cases} A \rightarrow MAX \\ \{X, Y, K, L\} \in X \\ \xi_i X - (C^1 Y^1 + C^2 Y^2) - 3_{CONST} - A - \delta_i l_i \geq 0 \\ i = 1, \dots, N \\ K = \left[\left(1 - \alpha_0 \pm \frac{3}{2\sqrt{N}} \right) N \right] \\ \sum_{i=1}^N \delta_i \leq N - K \\ \delta_i \in 0, 1. \end{cases}$$

Запишем полученную задачу в матричной форме (полагая $W=(A, X, Y)$):

$$\begin{cases} CW \rightarrow MAX \\ QW \leq f \\ -zW \geq -L\delta \\ K = \left[\left(1 - \alpha_0 \pm \frac{3}{\sqrt{N}} \right) N \right] \\ \sum_{i=1}^N \delta_i \leq N - K \\ \delta_i \in 0, 1. \end{cases}$$

Суть итерационного метода в следующем: для фиксированного значения δ_0 , удовлетворяющего условиям задачи, задача в матричной форме представляет собой стандартную задачу линейного программирования:

$$\begin{cases} CW \rightarrow MAX \\ QW \leq f \\ -zW \geq -L\delta. \end{cases}$$

Чтобы понять, как выглядит оптимальное значение обратится к двойственной задаче линейного программирования и по основной теореме [4, 6] имеем «вспомогательную задачу»:

$$\begin{cases} V(f, -L\delta_0) \rightarrow MIN \\ V \geq 0 \\ V(Q, -z)^T \geq C, \end{cases}$$

замечательное свойство данной двойственной задачи в том, что оптимальное решение принадлежит вершине линейного многогранника $V(Q, -\eta)^T \geq C$, который не зависит от δ_0 . Пусть V^p – вершины указанного многогранника, тогда «основная задача» формулируется так:

$$\begin{cases} \min V^p(f, -L\delta_0) \rightarrow MAX \\ V^p \geq 0 \\ K = \left[\left(1 - \alpha_0 \pm \frac{3}{\sqrt{N}} \right) N \right] \\ \sum_{i=1}^N \delta_i \leq N - K \\ \delta_i \in 0, 1. \end{cases}$$

Данная задача является уже «чистой» целочисленной задачей линейного программирования и может быть решена известными методами [18–20]. Итак, сформулируем предложения.

1. Для исходной задачи стохастического программирования оптимального планирования производства при аппроксимации левой части P -неравенства методом Монте-Карло на близкое (с вероятностью 0,99) по значениям выражение – следующий итерационный процесс сходится к оптимальному значению модифицированной задачи.

Шаг 1. Берем $\bar{V}: V(Q, -\eta)^T \geq C$.

Шаг 2. Решаем задачу целочисленного программирования (ЗЦП) – «основная» задача при фиксированном \bar{V} , находим Δ_0 .

Шаг 3. Решаем задачу линейного программирования (ЗЛП) – «вспомогательная» задача при фиксированном Δ_0 , находим V .

Шаг 4. Повторяет шаг 2 при подстановке вместо $V = \bar{V}$ и т. д.

В [16] доказано, что данный итерационный процесс сходится.

2. Если последовательность функции $f_n^1(X, A)$, $f_n^2(X, A)$ такова, что $f_n^1(X, A) \leq g(X, A) \leq f_n^2(X, A)$, где $g(X, A)$ – непрерывная функция, при этом сходимость $f_n^1 \rightarrow g$, $f_n^2 \rightarrow g$ равномерная при $n \rightarrow \infty$, то для задач математического программирования:

$$\begin{cases} A \rightarrow MAX \\ f_n^2(X, A) \geq 0 \\ X \in X \end{cases} \begin{cases} A \rightarrow MAX \\ f_n^1(X, A) \geq 0 \\ X \in X \end{cases} \begin{cases} A \rightarrow MAX \\ g(X, A) \geq 0 \\ X \in X \end{cases}$$

при условии существования и единственности для них оптимальных решений выполняется следующее:

$$A_{\max}^{1n} \rightarrow A_{\max}, A_{\max}^{2n} \rightarrow A_{\max}.$$

Практическая реализация

В качестве примера практической реализации можно привести модель планирования производственного предприятия в условиях действующего производства с номенклатурным перечнем 29 изделий (электровакуумные и полупроводниковые приборы, изделия из керамики) с ценами, имеющими нормальные распределения с заданными показателями математических ожиданий и дисперсий. Особенностью ценообразования на керамические и корпусные изделия в компании является их абсолютная зависимость от рыночных условий ввиду очень жесткой конкуренции и «демпинга» со стороны зарубежных производителей (Китай). Также на ценообразование влияет и курс доллара, поскольку зарубежные производители определяют цены именно в долларах для потребителей внутри России. Поэтому учет вариативности цен чрезвычайно важен для принятия правильных управленческих решений.

Доказано, что в случае нормально распределенных цен на товары модель может быть преобразована в задачу выпуклого программирования. С помощью аппарата решения задач выпуклого программирования найдено решение исходной задачи. Проведено сравнение полученных результатов указанной модели и ее «детерминированного аналога». Проведены вычисления решения задачи при использовании предложенного итерационного метода.

Итерационный метод на основе методов Монте-Карло и Бендерса опробован с числом реализаций случайных величин равным 100, 1000, 10 000. При сравнении решения задачи выпуклого про-

граммирования в случае нормально распределенных цен на товары и применением методов Монте-Карло и Бендерса (с решением пар задач линейного целочисленного программирования для получения оценок сверху и снизу для оптимального значения функции цели) удавалось получать узкие доверительные интервалы для оптимальных планов и оптимального значения. Скорость сходимости в общем виде соответствовала величине $\frac{3}{2\sqrt{N}}$. В общем

виде задачи линейного целочисленного программирования относятся к задачам дискретной оптимизации, которые открыли широкий класс задач, называемых *NP*-полными. Поэтому в общем случае нельзя сказать, что вычисления можно свести к полиномиальным алгоритмам. Поэтому стоит отметить, что при дальнейшем существенном увеличении номенклатуры выпускаемых изделий, а также числа реализаций случайных величин размерность задачи и объемы вычислений не позволили найти оптимальное решение быстро.

Представлена сравнительная таблица результатов планирования в «традиционной» детерминированной модели (где случайные величины заменены их математическими ожиданиями) с использованием стохастической модели на основе фиксации нормы риска в размере 10 % и статистических и прогнозных данных по ценам на планируемый период (в тыс. руб.):

Таблица. Сравнение результатов планирования в моделях детерминированной и стохастической

Оптимальные планы	Значение функции цели в линейной модели	Значение функции цели в стохастической модели
Оптимальный план в линейной модели	+673	-528,2
Оптимальный план в стохастической модели	-156,6	-304

Представленные результаты наглядно показывают, что «благополучность» оптимального плана детерминированной постановки в получении по-

ложительной прибыли в размере 673 тыс. рублей по факту приводит к убыткам в размере 528 тыс. рублей. Планирование с учетом прогноза изменения цен на товары предлагает руководству более оптимальное решение, заранее предупреждая о возможных убытках в размере 304 тыс. рублей.

Таким образом, учет стохастики позволяет получать более оптимальные решения, позволяющие руководству предприятий в условиях неопределенности цен принимать более взвешенные и правильные решения.

Заключение

Стохастическое программирование становится важным методом исследования целенаправленных процессов в экономике, биологии, военном деле и других отраслях исследований. Модели и методы стохастического программирования наиболее приспособлены к анализу сложных систем и принятию решений по управлению функционированием таких систем в ситуации, когда часть параметров, описывающих функционирование, не определена.

В работе проведен анализ задачи стохастического программирования, предназначенной для оптимального планирования производства, исследованы итерационные методы решения исходной задачи, построен итерационный метод для широкого класса распределений цен на товары с использованием методов Монте-Карло и Е.Ф. Бендерса.

Основным аппаратом исследования является теория вероятностей (аппарат центральной предельной теоремы, неравенство Чебышева, математическая статистика, теория выпуклого программирования), математическое программирование, теория целочисленного линейного программирования.

Указанные в статье методы оптимального планирования производства применяются на предприятии холдинговой компании ОАО «Новосибирский электровакуумный завод Союз» (ХК ОАО «НЭВЗ-Союз»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кремер Н.Ш. Исследование операций в экономике. – М.: ЮНИТИ, 1997. – 406 с.
2. Бережная Е.В., Бережной В.И. Математические методы моделирования экономических систем. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 368 с.
3. Канторович Л.В. Экономический расчёт наилучшего использования ресурсов. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 344 с.
4. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
5. Данциг Дж., Вольф П. Алгоритмы разложения для задач линейного программирования // Математика: сб. научн. трудов / под ред. Г.А. Андрианова. – 1964. – Т. 8. – № 1. – С. 151–160.
6. Шмырев В.И. Введение в математическое программирование. – Новосибирск: Новосиб. ун-т, 2002. – 192 с.
7. Данциг Дж. Линейное программирование, его применение и обобщение / Пер. с англ. Г.Н. Андрианова. – М.: Прогресс, 1966. – 600 с.
8. Charnes A., Cooper W.W. Deterministic equivalents for optimizing and satisfying under chance constraints // Oper. Res. – 1963. – № 11. – P. 18–39.
9. Бурдачева Н.А., Солдатов Н.В., Новицкий К.А., Травкин А.М. Интерактивная имитационная модель оперативного планирования производственных процессов // Интерактивные технологии моделирования и управления. МАДИ № 2/46. – М.: Ротапринт МАДИ, 2010. – С. 9–15.
10. Кардаш В.А., Рапопорт Э.О. Моделирование экономических процессов в сельском хозяйстве. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1979. – 155 с.
11. Кардаш В.А. Введение в стохастическую оптимизацию. – Ново-Черкасск: Изд-во НГТУ, 1996. – 113 с.
12. Ермолов Ю.М., Ястремский А.И. Стохастические модели и методы в экономическом планировании (Задачи и методы стохастического программирования). – М.: Наука, 1979. – 253 с.
13. Юдин Д.Б. Математические методы управления в условиях неполной информации. – М.: Советское радио, 1974. – 399 с.

14. Ермолев Ю.М. Методы стохастического программирования. – М.: Наука, 1976. – 340 с.
15. Растринин Л.А. Статистические методы поиска. Теоретические основы технической кибернетики. – М.: Наука, 1968. – 378 с.
16. Robbins H., Monro S.A stochastic approximation method // Ann. Math. Stat. – 1951. – V. 22. – P. 400–407.
17. Ширяев А.Н. Элементарная теория вероятностей. Математические основания. Предельные теоремы. – М.: МЦНМО, 2004. – 519 с.
18. Ковалев М.М. Дискретная оптимизация. (Целочисленное программирование). – Минск: Изд-во БГУ, 1977. – 191 с.
19. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях. – М.: Мир, 1974. – 520 с.
20. Кофман А., Анри-Лабордер А. Методы и модели исследования операции: Целочисленное программирование. – М.: Мир, 1977. – 432 с.

Поступила 18.04.2012 г.

УДК 004.89

МЕТОД ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СИТУАЦИЙ И СЕМАНТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.В. Разин, А.Ф. Тузовский

Томский политехнический университет
E-mail: moonbreeze@sibmail.com

Предлагается подход к построению систем автоматизированного анализа ситуаций, основанный на стеке технологий Semantic Web. Описание подхода включает формальную модель описания ситуаций, описание базовых онтологий, реализующих её, и описание архитектуры системы анализа ситуаций. Приводится пример описания ситуации при помощи интерпретации предлагаемой формальной модели в терминах OWL-онтологий.

Ключевые слова:

Анализ ситуаций, Semantic Web, онтологии, OWL, продукционные правила.

Key words:

Situational analysis, Semantic Web, ontologies, OWL, productional rules.

Анализ ситуаций является одной из задач принятия решений. Автоматизация анализа ситуаций позволяет выявлять текущие состояния системы, которые могут быть важными для конечного пользователя, и требуют оперативного принятия решений. Для выполнения такого анализа требуется определить язык описания ситуаций и сформировать алгоритм выявления интересующих пользователей ситуаций. Одним из подходов к принятию решений на основе формального анализа ситуаций является метод ситуационного управления [1]. В данном методе предлагается использовать логические модели для описания ситуаций и работы с ними. В настоящее время в рамках концепции Semantic Web активно развиваются семантические технологии, использующие специальный вид семантических моделей – онтологии.

В рамках данной работы описывается подход к анализу ситуаций, основанный на применении семантических технологий.

Основной идеей предлагаемого подхода является разработка онтологий для описания ситуаций и использование продукционных правил для их анализа.

Онтология – модель предметной области, состоящая из множества понятий, множества экземпляров понятий и множества отношений (свойств). Отношения могут быть как объектными (связывающими понятия и их экземпляры друг с другом),

так и литеральными (связывающими понятия и их экземпляры с текстовыми строками). Множество понятий и отношений между ними определяют общую схему хранения данных, представленных как множество утверждений об экземплярах понятий, или аксиом онтологий. Эти утверждения, или триплеты, имеют вид «субъект–предикат–объект». Основными языками, при помощи которых описываются онтологии, являются стандартизованные консорциумом W3C языка RDF [2] и OWL [3].

Один из возможных подходов к описанию ситуации при помощи онтологий был описан в работе [4]. В данном подходе описание ситуаций предлагается разделять на две части. Первая часть – базовая онтология описания ситуаций, представляющая абстрактную ситуацию с учётом контекста пространства-времени. Вторая часть – онтология, описывающая конкретную предметную область и относящиеся к ней возможные классы ситуаций, к которым в тот или иной момент времени может принадлежать ситуация на объекте управления. Онтология предметной области в этом случае будет расширением (надстройкой) над базовой онтологией и будет содержать понятия, наследующие понятиям базовой онтологии. Исходные данные о ситуации, поступающие в систему, например, с датчиков, при этом преобразуются в экземпляры понятий онтологии предметной области и отношения между ними.

Для определения закономерностей взаимодействия элементов управляемой системы, а также описания изменений их состояния с течением времени используются продукционные правила вида «если ... то ...». Набор правил, задаваемых пользователем, загружается в систему логического вывода, которая на основе содержащихся в онтологии утверждений создаёт согласно этим правилам новые экземпляры отношений более высокого уровня, соответствующие искомым ситуациям.

Продукционные правила можно задавать как в виде правил прямого, так и в виде правил обратного логического вывода. В первом случае система логического вывода работает «от фактов к цели», применяя к содержащимся в онтологии данным все допустимые правила до тех пор, пока имеется возможность применять эти правила (т. е. пока есть данные, соответствующие части «если», используемого правила). При выполнении обратного логического вывода действия системы вывода выполняются в обратном направлении, «от цели» правила. Для каждого из элементов блока «если» в онтологии ищутся соответствующие ему утверждения либо, если существуют правила, в которых этот элемент стоит в блоке «то», обратный вывод рекурсивно применяется к этим правилам. При задании системы продукционных правил можно комбинировать оба этих подхода. Для описания наборов правил можно использовать существующие стандартизованные языки описания продукционных правил для машин вывода на онтологиях, например, такие как SWRL [5] или RIF [6].

В рамках предлагаемого подхода была учтена необходимость представлять описание структуры объекта управления в контексте пространства–времени, а также возможная неполнота знаний об элементах этого описания. В связи с этим под ситуацией S в данном случае понимается совокупность всех сведений о текущем и всех предыдущих состояниях объекта управления, или система $\langle O, R, E, F, \text{Rul} \rangle$, где O – множество физических объектов, входящих в состав управляемой системы, R – множество областей в пространстве, E – множество событий, происходящих в управляемой системе, F – множество предикатов, отражающих связи между элементами множеств O , R , и E , а Rul – множество продукционных правил вида $(F \Rightarrow G)$ и $(F \Leftrightarrow G)$, описывающих базовые механизмы логического вывода, в том числе ограничения на значения предикатов F , а также предусловия и следствия для происхождения событий E .

Фактически, в такой интерпретации ситуацию S можно обозначить как полное состояние объекта управления. При этом под классом ситуаций C подразумевается некоторый кортеж $\langle O', R', E', F' \rangle$, где O' , R' , E' – это множества переменных, обозначающих элементы множеств O , R , E соответственно, а F' – подмножество F , каждый элемент которого – предикат, аргументами которого являются элементы множеств O' , R' и E' . Класс ситуаций фактически является шаблоном, описывающим отноше-

ния между частью элементов объекта управления. Таким образом, ситуация на объекте управления анализируется с целью выявления тех классов ситуаций, к которым она принадлежит. Обозначим как обоснование класса ситуаций C_B интерпретацию класса ситуаций C на множествах $\langle O, R, E, F \rangle$.

Иначе говоря, обоснованием класса ситуаций C будет такая подстановка элементов O , R и E вместо переменных из O' , R' и E' , при которой все флюенты из F' будут истинны.

Будем говорить, что ситуация S принадлежит к классу C , если S содержит обоснование C . Иначе говоря, если C – шаблон, то C_B – часть описания ситуации, подходящая к этому шаблону.

Как было упомянуто выше, описание ситуации включает в себя множество областей в пространстве R . С помощью предикатов F эти области могут быть ассоциированы с объектами и событиями (элементами множеств O и E соответственно). Таким образом, знания о том, где находятся объекты и где происходят события, содержатся, в первую очередь, в описании областей в пространстве (элементов R), соответствующих объектам и событиям, а взаимное расположение объектов и областей, в которых действуют те или иные события, может быть логически выведено. Качественные отношения взаимного расположения областей в пространстве основываются, с одной стороны, на исчислении соединения областей (RCC – region connection calculus) [7] и, с другой стороны, на псевдофизических логиках, описанных в работе [1].

На рис. 1 и рис. 2 соответственно представлены схемы общей онтологии описания ситуации и диаграмма импортов онтологий, формирующих базовую онтологию описания ситуаций.

Непременным атрибутом события является время его наступления, а также задействованные в нём объекты. Это выражается предикатом $\text{holds}(e_1, o_1, o_2, \dots, o_n, \tau_1)$, где τ_1 соответствует промежутку времени, в течение которого происходит событие. Также событие можно ограничить некоторой областью в пространстве: $\text{holds}(e_1, o_1, o_2, \dots, o_n, r_1, \tau_1)$. Предусловия и следствия выражаются при помощи продукционных правил – элементов множества правил Rul . Возможность наступления события в контексте пространства–времени выражается предикатом $\text{possible: possible}(e_1, o_1, o_2, \dots, o_n, \tau_1)$.

Пример правила для предусловия:

$$f_1(o_1, o_2, \tau_1) \wedge f_2(o_1, o_3, \tau_2) \wedge f_3(o_4, o_5, \tau_3) \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{possible}(e_1, o_1, o_2, o_3, o_4, o_5, \tau_1).$$

Пример правила для следствия:

$$\text{holds}(e_1, o_1, o_2, o_3, o_4, o_5, \tau_1) \Rightarrow \\ \Rightarrow f_1(o_1, o_2, \tau_1) \wedge f_2(o_1, o_3, \tau_2) \wedge f_3(o_4, o_5, \tau_3).$$

В рамках данного подхода события можно разделить на три группы: внутренние (события, происходящие внутри объекта управления), внешние (события, наступление которых вызвано извне объекта управления), и события-действия (собы-

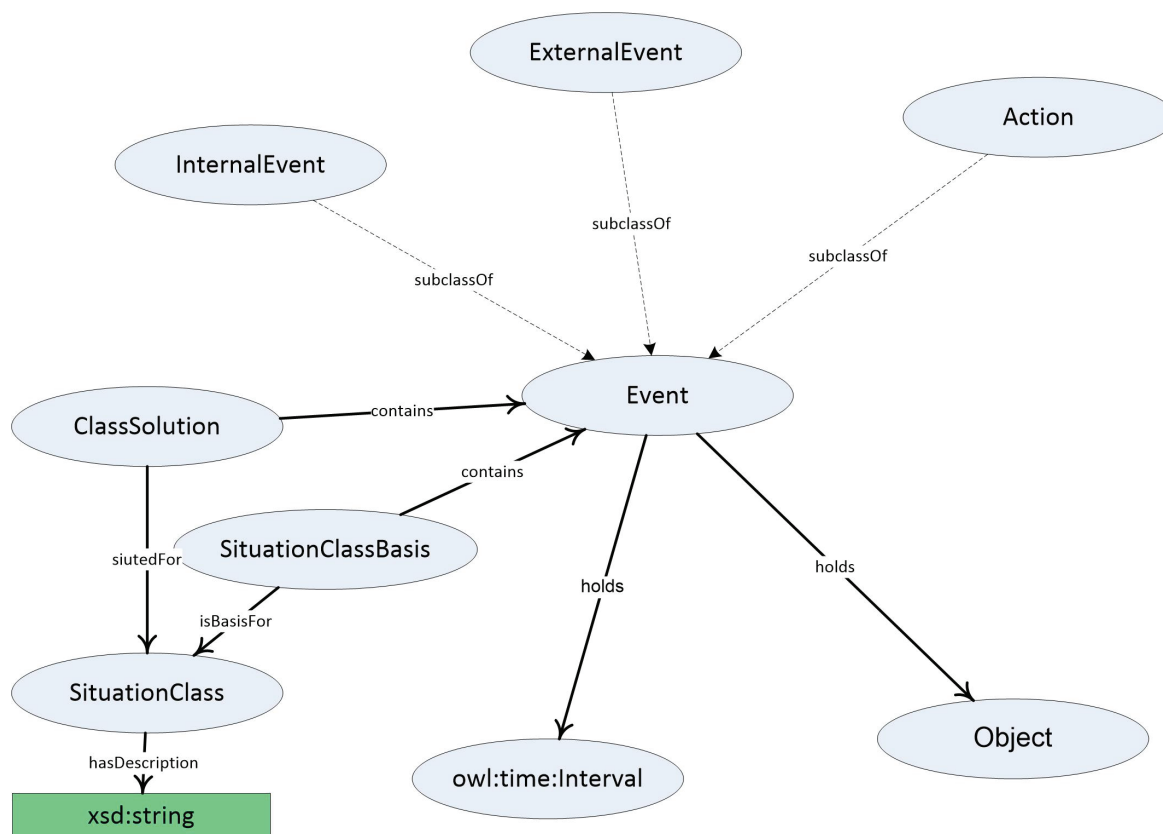


Рис. 1. Общая онтология описания ситуаций

тия, наступление которых вызвано человеком). Каждый вид событий обладает своей спецификой: внутренние события описывают поведение элементов управляемой системы и, следовательно, обладают как предусловием, так и следствием, внешние события исходят извне системы и, не являясь предсказуемыми, обладают только следствием, а события-действия обладают и предусловием, и следствием, однако предполагают некоторую свободу воли и потому не обязательно наступают немедленно по выполнении своего предусловия.

Будем говорить, что событие e_1 переводит ситуацию S в/из класса C , если в результате его наступления ситуация S стала/перестала принадлежать этому классу (или если в результате его наступления S стала/перестала включать обоснование C).

Фактически, в рамках данного подхода события инкапсулируют в себе всю динамику объекта управления: любое изменение состава его элементов или отношений между ними (то есть изменения множеств O, R, E, F) соответствует некоторому событию, и наоборот.

Обозначим как решение для класса ситуаций C совокупность $E_{Sol}=\{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$, при наступлении которых в некоторой ситуации S , принадлежащей классу ситуаций C , данная ситуация перестаёт принадлежать этому классу. При этом решения могут быть в данный момент времени доступными и недоступны-

ми. Доступным решением является такая совокупность событий $E_{Sol}=\{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$, которые для каждого e_i являются истинными: $holds(e_i, o_1, o_2, \dots, o_n, \tau_N)$ (напомним, что τ_N – переменная, соответствующая данному моменту времени) или $possible(e_i, o_1, o_2, \dots, o_n, \tau_N)$ для событий-действий.

Общая онтология описания ситуаций (рис. 1) включает понятия события $Event$ с дочерними понятиями $InternalEvent$ (внешнее событие), $ExternalEvent$ (внутреннее событие) и $Action$ (действие), понятие $Object$, а также понятия $SituationClass$ (класс ситуаций), $SituationClassBasis$ (обоснование класса ситуаций) и $ClassSolution$ (решение для класса ситуаций). Время происхождения события $Event$ описывается при помощи понятия $Interval$ онтологии $OWL-Time$ [8].

Онтология RCC (рис. 2) определяет отношения исчисления соединения областей, $Spatial$ и $QualitativeSpatial$ – области в пространстве и качественные отношения между ними соответственно, $owl:time$ – онтология описания времени [8], $Interval$ – онтология, описывающие отношения интервальной алгебры Аллена. Онтология $Core$ сводит все элементы описания ситуации воедино и, по существу, является базовой онтологией описания ситуаций, которой будет наследовать любая онтология, описывающая конкретную предметную область, классы ситуаций и решения в ней.

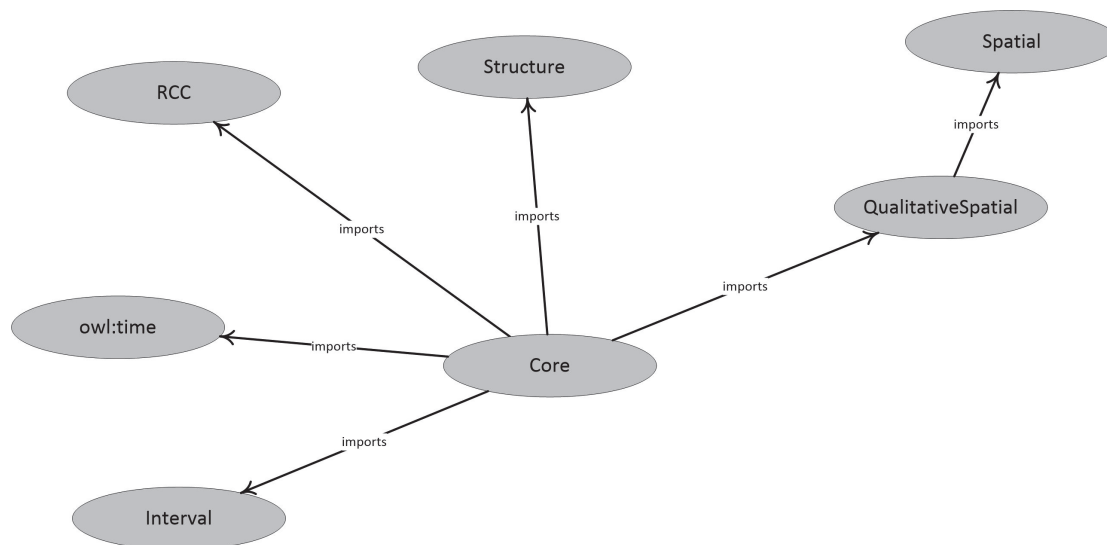


Рис. 2. Схема импорта онтологий

Основные элементы системы анализа ситуаций на основе описываемого подхода представлены на рис. 3.

Приведём описание тестовой ситуации. Пусть требуется описать выезд такси к клиенту. Клиент находится на указанной им точке подбора, при этом какое-либо свободное такси должно доехать туда возможно быстрее и подобрать пассажира (таксист подъезжает к точке и либо сразу подбирает пассажира, либо сообщает о прибытии диспетчеру, который звонит клиенту).

Допустим, что клиент будет ждать 15 минут, а потом отменит заказ и обратится в другое такси. Введём в онтологию описания ситуации понятия Client, Taxi, и PickupPoint (точка подбора). Обобщим недопустимую в данном примере ситуацию до класса ситуаций «ожидание клиентом такси в течение 15 минут», обозначив его как ClientWaiting1. Ниже приведены правила, описывающие такой класс ситуаций, согласно которым система его распознает (здесь и далее продукционные правила приводятся в нотации SWRL).

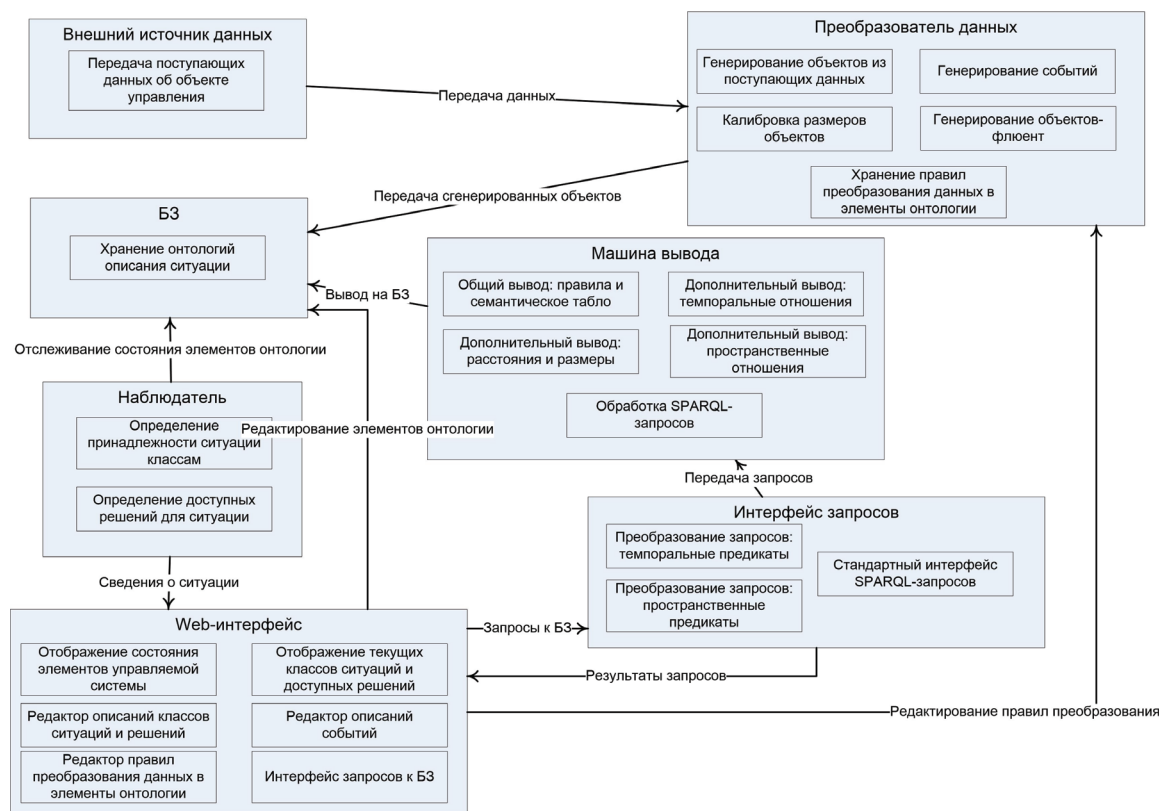


Рис. 3. Общая схема системы анализа ситуаций

$ClientWaiting1(?sitclass) \wedge Client(?c1) \wedge$
 $PickupPoint(?PP) \wedge Interval(?tp1) \wedge WaitEvent(?we1) \wedge$
 $holds(?we1, c1) \wedge holds(?we1, ?PP) \wedge$
 $holds(?we1, ?tp1) \wedge duration(?tp1, ?dur) \wedge$
 $greaterThan(?dur, 15) \wedge hasBeginning(?tp1, ?timepoint1) \wedge$
 $subtract(?res, Now, ?timepoint1) \wedge$
 $lessThan(?res, 15) \Rightarrow active(?sitclass1, true) \wedge$
 $makeInstance(?CWBasis) \wedge$
 $ClientWaitingBasis(?CWBasis) \text{ confains(?CW Basis, cw1)}.$

Здесь WaitEvent – событие, заранее определённое как:

$Client(?cl) \wedge Location(?loc) \wedge Interval(?tp1) \wedge$
 $\wedge waiting(?cl, true) \wedge waitingTime(?cl, ?tp1) \wedge$
 $\wedge occupies(?cl, ?loc) \Rightarrow makeInstance(?waitEvent) \wedge$
 $\wedge WaitEvent(?waitEvent) \wedge$
 $\wedge holds(?waitEvent, ?cl) \wedge holds(?waitEvent, ?loc) \wedge$
 $\wedge holds(?waitEvent, ?tp1).$

Опишем возможное решение для класса ситуаций ClientWaiting1. Наиболее очевидным решением будет подбор клиента на точке с ожиданием прибытия клиента в течение, к примеру, 10 минут. Создадим экземпляр понятия ClassSolution и понятие PickupEvent, наследующее понятию InternalEvent. Создадим также экземпляр PickupEvent и пометим его как часть решения для класса ситуаций

ClientWaiting1. Полученная онтология показана на рис. 4.

Приведём описание события PickupEvent:

$Taxi(?taxi1) \wedge Client(?c11) \wedge waiting(?c11) \wedge$
 $ExecutePickupOrderEvent(?pickupOrder) \wedge$
 $\wedge VeryCloseSituadedEvent(?vCloseSit) \text{ Interval(?tp1) } \wedge$
 $\wedge Interval(?tp2) \wedge holds(?pickupOrder, ?taxi1) \wedge$
 $\wedge holds(?pickupOrder, ?c11) \wedge holds(?pickupOrder, ?tp1) \wedge$
 $\wedge holds(?vcloseSit, ?taxi1) \wedge holds(?vCloseSit, ?c11) \wedge$
 $\wedge holds(?vCloseSit, ?tp2) \wedge$
 $\wedge inside(?tp2, ?tp1) \Rightarrow makeInstance(?pickup) \wedge$
 $\wedge makeInstance(?tp3) \wedge PickupEvent(?pickup) \wedge$
 $\text{ Interval(?tp3) } \wedge holds(?pickup, ?taxi1) \wedge$
 $\wedge holds(?pickup, ?c11) \wedge holds(?pickup, ?tp3) \wedge$
 $hasBeginning(?tp3, ?arrival) \wedge add(?result, ?arrival, 10) \wedge$
 $\wedge hasEnd(?tp3, ?result).$

Упомянутые в описании события VeryCloseSituadedEvent и ExecutePickupOrderEvent указывают на то, что для выполнения события PickupEvent необходимо, чтобы такси находилось на близком расстоянии от клиента и выполняло распоряжение подобрать его, соответственно. Формально распоряжение подобрать клиента можно разделить на два: прибыть в определённую точку и, собственно, подобрать клиента. Рассмотрим первое из этих распоряжений (обозначим как событие MovementOrderEvent):

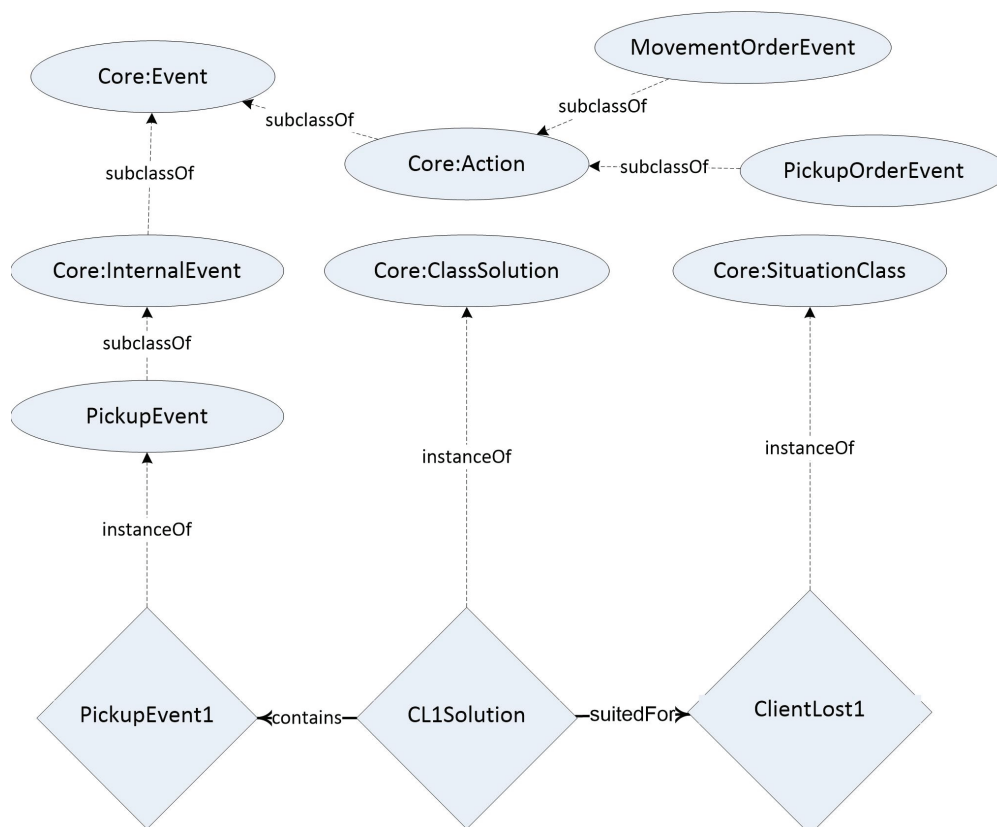


Рис. 4. Онтология описания тестовой ситуации

$$\begin{aligned} & \text{Taxi}(?taxi1) \wedge \text{MovementOrderEvent}(?moveOrder) \wedge \\ & \text{Interval}(?tp1) \wedge \text{holds}(?moveOrder, ?taxi1) \wedge \\ & \text{holds}(?moveOrder, ?tp1) \wedge (?tp1, ?orderReceived) \Rightarrow \\ & \text{makeInstance}(?moveEvent) \wedge \text{makeInstance}(?tp2) \wedge \\ & \text{MovementEvent}(?moveEvent) \wedge \text{Interval}(?tp2) \wedge \\ & \text{holds}(?moveEvent, ?tp2) \wedge \\ & \text{hasBeginning}(?tp2, ?orderReceived). \end{aligned}$$

События `MovementOrderEvent` и `ExecutePickupOrderEvent` в описании предметной области наследуют понятию `Action` базовой онтологии, то есть являются результатом действий пользователя системы, лица, принимающего решения. В процессе обработки доступных решений машина вывода работает по принципу обратного вывода, проводя поиск по продукционным правилам, находящимся в онтологии. В данном случае в левой части правила-описания для события `PickupEvent`, помеченного как решение, содержатся события `VeryCloseSituatingEvent` и `ExecutePickupOrderEvent`. Второе из них является событием-действием, в отличие от первого, в левой части описания которого рекурсивно проводится поиск вхождений других событий. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут обнаружены все события-действия (в данном случае `MovementOrderEvent` и `PickupOrderEvent`). Полу-

ченный в результате поиска список необходимых действий выдается пользователю в качестве одного из возможных решений для ситуации.

Заключение

Семантический подход к анализу ситуаций позволяет эксперту или группе экспертов описывать при помощи единого стандартизованного языка общую модель исследуемой предметной области, а также задавать с помощью используемого набора набора продукционных правил способ обработки исходных данных, поступающих в онтологическую модель в виде экземпляров понятий.

Применение семантических технологий в системах анализа ситуаций обеспечивает гибкость описания структуры модели объекта управления, а также гибкость описания его поведения в виде набора правил. Кроме этого, применение семантических технологий предоставляет экспертам, с одной стороны, возможность вносить в неё свои знания и, с другой стороны, сохраняет возможность автоматизированной обработки массивов данных нижнего уровня, поступающих с датчиков. Онтологическое описание предметной области и метода обработки исходных данных при помощи стандартизованных консорциумом W3C языков позволяет делать вывод о высокой масштабируемости подобного решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
2. Manola F., Miller E. RDF Primer. W3C Working Draft // World Wide Web Consortium (W3C). 2004. URL: <http://www.w3.org/TR/rdf-primer> (дата обращения: 09.09.2012).
3. Herman I., Horrocks I., Patel-Schneider P. F. et al. OWL 2 Web Ontology Language Document Overview // World Wide Web Consortium (W3C). 2007. URL: <http://www.w3.org/2004/OWL/> (дата обращения: 09.09.2012).
4. Matheus C., Kokar M. et al. SAWA: An Assistant for Higher-Level Fusion and Situation Awareness // SPIE Conference on Multisensor, Multisource Information Fusion: Proceedings of SPIE. – Orlando, FL., 2005. – V. 5813. – P. 75–85.
5. Patel-Schneider P.F., Horrocks I. et al. SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML // World Wide Web Consortium (W3C). 2004. URL: <http://www.w3.org/Submission/SWRL/> (дата обращения: 09.09.2012).
6. Wélty C., Hawke S. Rule Interchange Format // RIF Working Group. 2005. URL: http://www.w3.org/2005/rules/wiki/RIF_Working_Group (дата обращения: 09.09.2012).
7. Renz J. Qualitative Spatial Reasoning with Topological Information. Lecture Notes in Computer Science 2293. – Berlin: Springer Verlag, 2002. – 207 p.
8. Hobbs J., Pan F. Time Ontology in OWL // World Wide Web Consortium (W3C). 2006. URL: <http://www.w3.org/TR/owl-time/> (дата обращения: 09.09.2012).

Поступила 10.09.2012 г.

УДК 519.23

К СТАТИСТИКЕ МОРФОЛОГИИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ДВУМЕРНЫМ ТОЧЕЧНЫМ ПОТОКОМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Д.В. Дубинин, А.И. Кочегуров*, В.Е. Лаевский (V. Geringer)**

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: dima@info.tusur.ru

*Томский политехнический университет

E-mail: kai@cc.tpu.edu.ru

**Baden-Württemberg Cooperative State University, Faculty of Engineering,

Friedrichshafen, Germany

E-mail: geringer@DHBW-Ravensburg.de

Исследуются характеристики морфологии пространственно-временных сигналов, полученных при помощи двумерного рекуррентного точечного потока восстановления [1], обладающего рядом свойств: стационарностью, отсутствием последствий, ординарностью. Исследования проводились с помощью программного комплекса стохастического моделирования «КИМ СП» [2]. Выбор групп составных элементов контурного рисунка поля, определяющих его морфологию (форму контурной структуры), значения финальных вероятностей появления составляющих элементов, задается оператором.

Ключевые слова:

Исследования на моделях, стохастическое моделирование, моделирование пространственно-временных сигналов, двумерный поток восстановления, поток Пальма, одноуровневая цепь Маркова.

Key words:

Research on models, stochastic simulation, modelling the space-time signals, two-dimensional renewal process, ordinary point process of Palms, one-step Markov chains.

Актуальность проблемы

В настоящее время широкое применение находят системы получения информации, включающие обработку пространственно-временных сигналов. При решении задач синтеза, доводки существующих комплексов, их оптимизация немыслима без поддержки компьютерных систем, в частности прикладного моделирования сложных процессов и статистического анализа многомерных данных.

Большое значение имеет выбор адекватной математической модели при построении наблюдаемых данных. На данный момент не существует универсального способа формирования случайных полей с произвольно заданными характеристиками, а полное решение проблемы описания реальных изображений в общем случае отсутствует. Поэтому известные модели случайных полей соответствуют реальным пространственно-временным сигналам лишь по ограниченному числу характеристик [3] (форма корреляционной функции, радиус корреляции, контрастность, размеры и т. п.). В работах [2, 4, 5] приведена методика построения случайных яркостных полей, аппроксимированных двумерным рекуррентным точечным потоком восстановления.

В данной работе приводятся результаты статистического анализа полей, полученных по методике [2]: исследование закона распределения числа сегментов изображения, зависимость его от морфологии поля, определение среднего значения и дисперсии числа сегментов.

Результаты обработки статистических данных

В ходе компьютерного моделирования были построены яркостные поля на различных типах

морфологий изображений: мозаики типа F , FB , FC , FD , FE . Каждое изображение строилось построчно. Оно содержало $n \times n$ простейших элементов, где n — число отсчетов. Совокупность простейших элементов для каждого типа мозаики приведена в работе [2]. На рис. 1 показаны моменты восстановления в структуре получаемого изображения.

Мозаики каждого типа были получены для размерностей изображений 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200 отсчетов. На рис. 2 приведены примеры некоторых мозаик типа F , FB , FC , FD , FE при числе отсчетов 200.

Для каждого типа мозаики и каждой размерности было построено тысяча изображений, для каждого из которых было получено распределение количества сегментов. На рис. 3 приведены примеры распределения числа сегментов для мозаик типа FC , FD при количестве отсчетов 60.

Для каждого типа мозаик при различном числе отсчетов была проведена проверка гипотезы о нормальном распределении числа сегментов. Проверка проводилась по критерию согласия Пирсона с коррекцией Йетса [6]:

$$d = \sum_{j=1}^k \frac{(m_j - n' \cdot p_j)^2}{n' \cdot p_j},$$

где k — количество групп, оцениваемое по формуле Стерджеса [7]; m_j — экспериментальное количество значений в j -й группе; p_j — теоретическая вероятность попадания значений в j -ю группу при нормальном распределении; n' — размер выборки.

Гипотеза о нормальном распределении H_0 считалась истинной, если выполнялось неравенство

$$d < \chi^2(\alpha, k - 2),$$

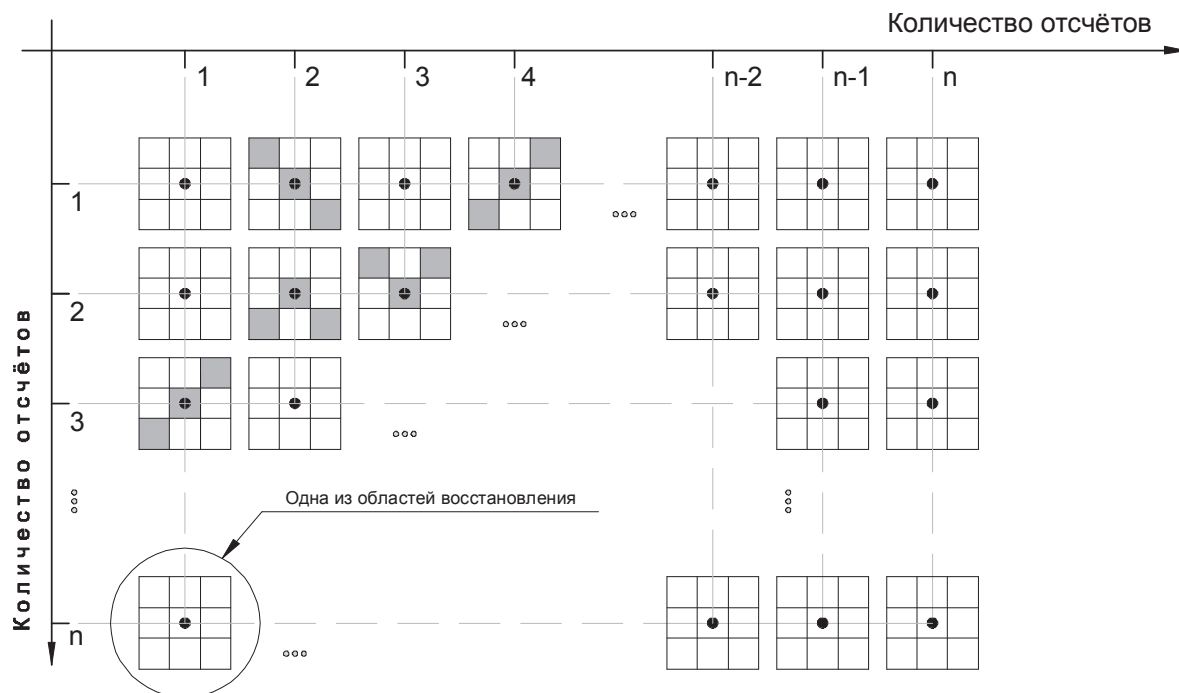


Рис. 1. Моменты восстановления рекуррентного точечного потока в растре изображения

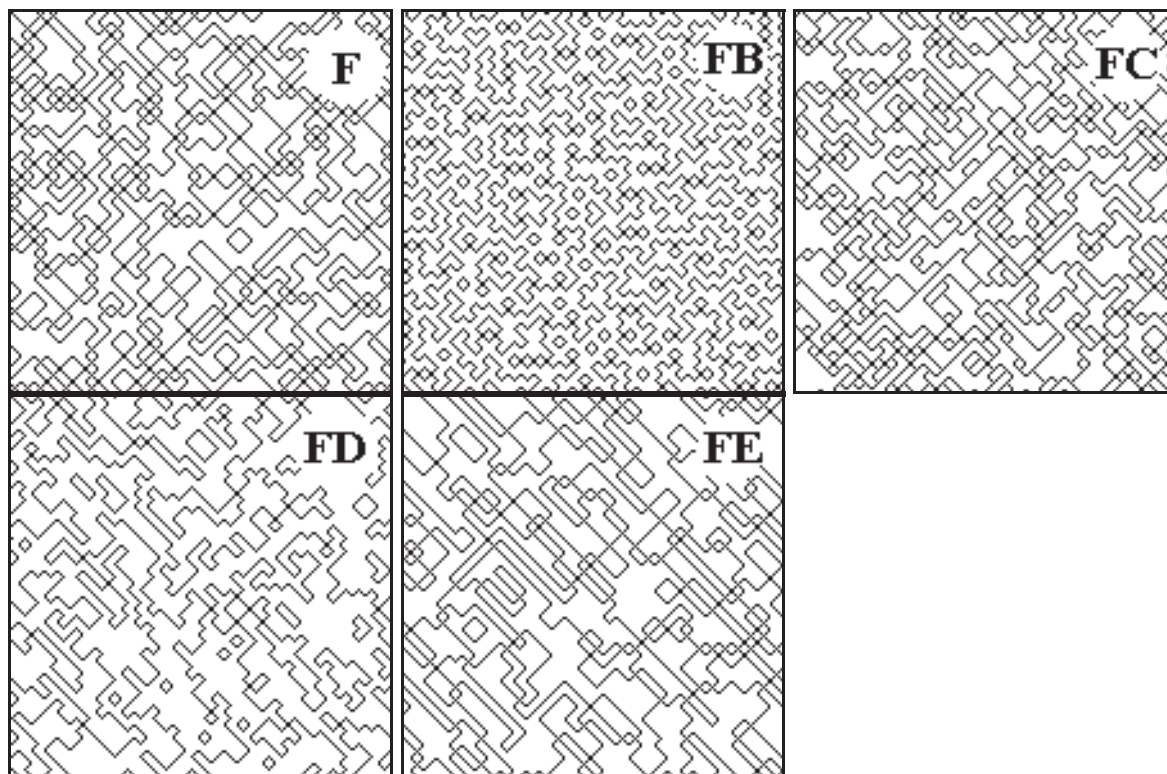


Рис. 2. Примеры сегментов мозаик типов F, FB, FC, FD, FE

где α – уровень значимости, $(k-2)$ – число степеней свободы.

При $\alpha=0,05$, $k=11$ квантиль распределения хи-квадрат:

$$\chi^2(\alpha, k-2) = \chi^2(0,05, 9) = 16,91.$$

Гипотеза о нормальности распределения H_0 нашла подтверждение в 73 % случаях для мозаик типа F, в 84 % – для мозаик типа FB, в 95 % – для мозаик типа FC, в 78 % – для мозаик типа FD, в 89 % – для мозаик типа FE.

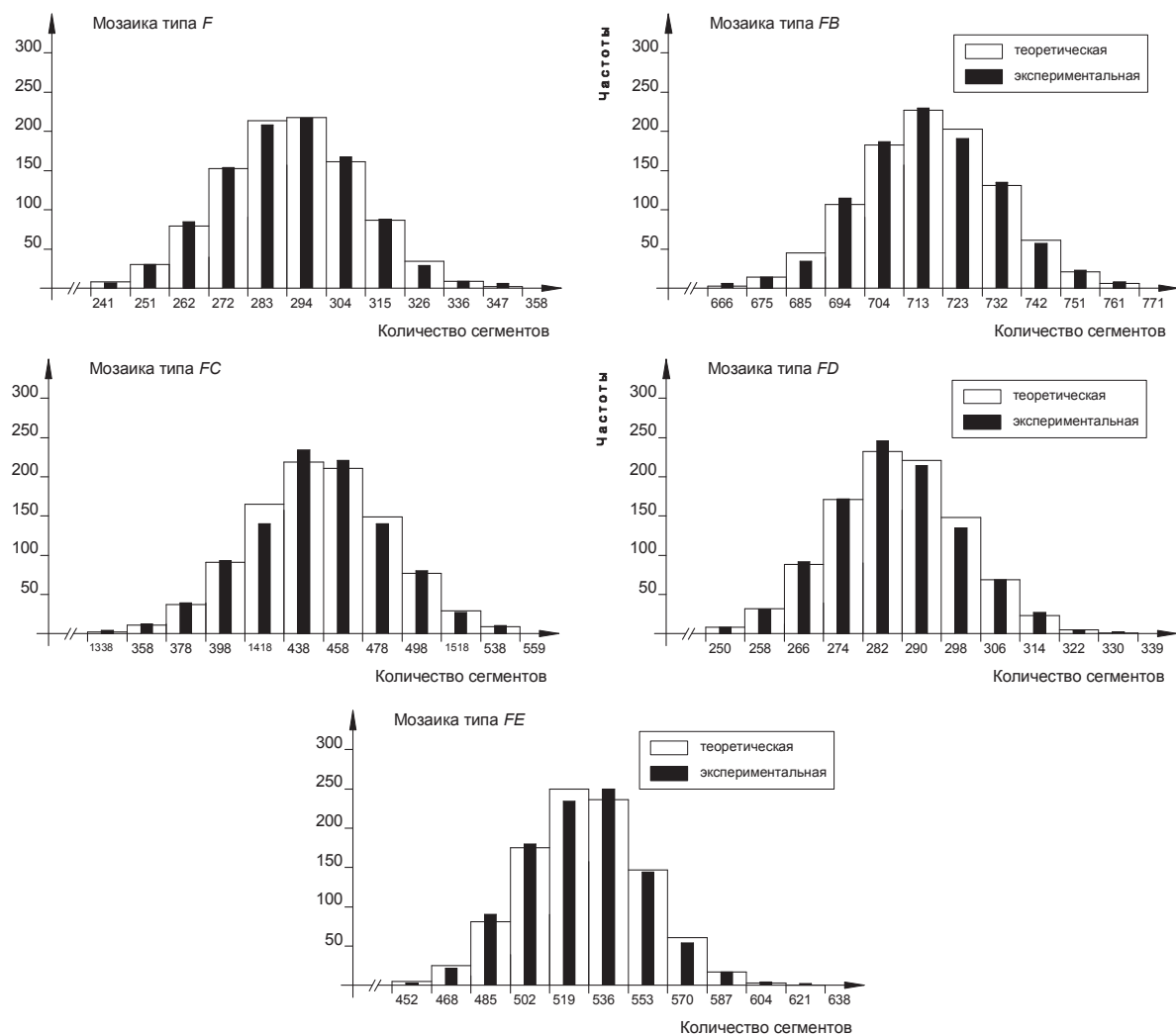


Рис. 3. Распределение количества сегментов мозаик F, FB, FC, FD, FE

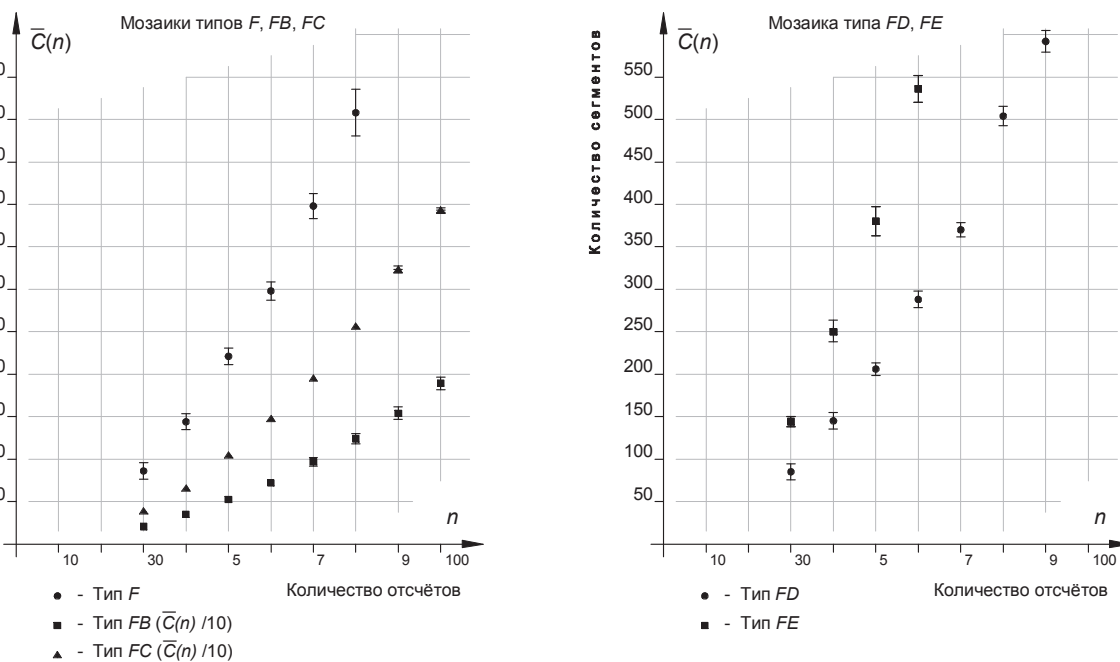


Рис. 4. Зависимость среднего числа сегментов от количества отсчетов

На основании полученных данных было проведено исследование зависимости среднего числа сегментов от размерности изображения. Данные показывают, что с увеличением размерности изображения среднее число сегментов возрастает по квадратичному закону. На рис. 4 приведены зависимости для мозаик всех типов.

Для записи этой зависимости в аналитическом виде была применена аппроксимация результатов по методу наименьших квадратов. Коэффициенты квадратного полинома вычислялись по данным восьми размерностей изображений: 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100. Данные размерностей 150 и 200 использовались для вычисления ошибок аппроксимации. В частности, для мозаики типа FC зависимость среднего числа сегментов от числа отсчетов изображения $\bar{C}_{FC}(n)$ определяется соотношением

$$\bar{C}_{FC}(n) = 0,3646 \cdot n^2 + 3,4536 \cdot n - 48,5357.$$

Погрешность экстраполяции для числа отсчетов 150 и 200 составила менее 1 %.

Подобные зависимости среднего числа сегментов от числа отсчетов изображения $\bar{C}(n)$ получены для мозаик других типов. Квадратичный характер зависимости сохраняется во всех случаях. Погрешности аппроксимации не превышают 5 %. В табл. 1 приведены аналитические зависимости среднего числа сегментов $\bar{C}(n)$ от количества отсчетов n для всех типов мозаик, а также относительные погрешности аппроксимации этих зависимостей при числе отсчетов 150 и 200.

Таблица 1. Зависимость среднего числа сегментов от количества отсчетов

Тип мозаики	Зависимость среднего значения числа сегментов $\bar{C}(n)$ от количества отсчетов n	Относительная погрешность, %	
		при 150 отсчетах	при 200 отсчетах
F	$0,069n^2+0,8589n-0,1488$	1,6	1,89
FB	$0,1695n^2+1,9685n-2,7798$	1,0	1,36
FC	$0,3646n^2+3,4536n-48,5357$	0,31	0,89
FD	$0,0667n^2+0,6476n-7,9881$	2,6	3,0
FE	$0,1366n^2+0,5065n-9,0655$	3,15	3,91

Анализ полученных данных позволил построить зависимости среднеквадратических отклонений количества сегментов от числа отсчетов $\sigma(n)$. Данные показывают, что с увеличением размерности изображения СКО числа сегментов возрастает по линейному закону. На рис. 5 приведены зависимости $\sigma(n)$ для всех типов мозаик и максимальные погрешности аппроксимации на всём промежутке количества отсчетов.

Для записи зависимости в аналитическом виде был применен аналогичный подход, описанный выше. Отличие заключалось в выборе аппроксимирующей функции. Результаты, полученные в ходе моделирования, показывают, что исследуемая зависимость носит линейный характер. В частности, для мозаики FC зависимость СКО числа сегментов $\sigma_{FC}(n)$ от количества отсчетов изображения n описывается соотношением

$$\sigma_{FC}(n) = 0,5661 \cdot n + 1,069.$$

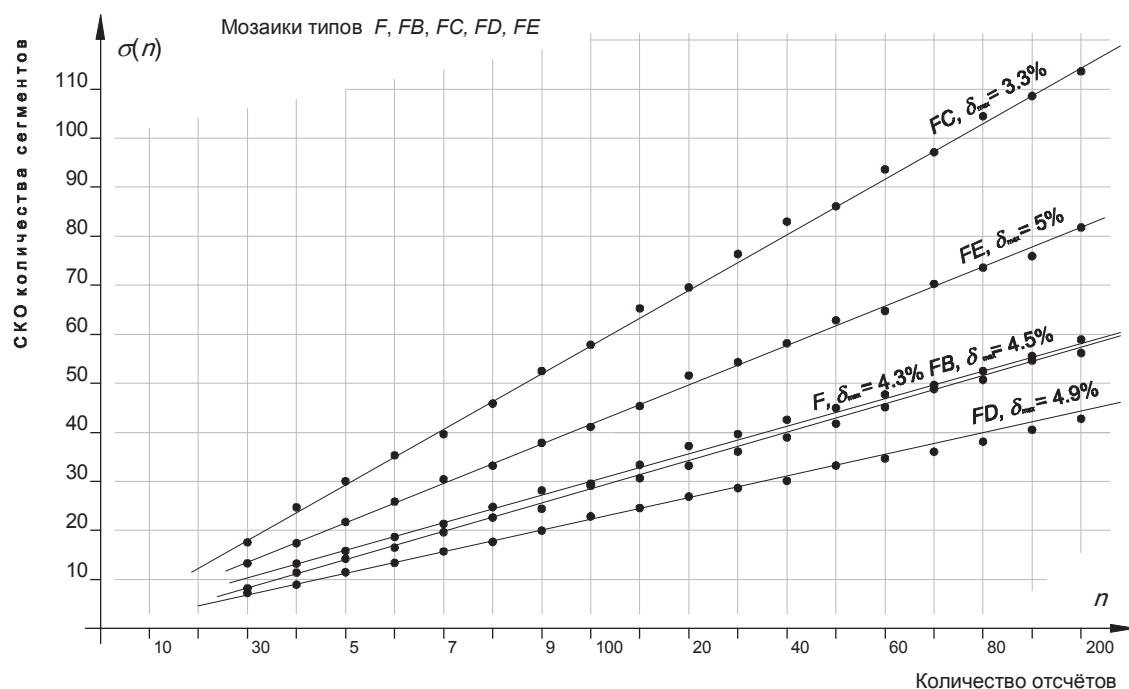


Рис. 5. Зависимость СКО числа сегментов от количества отсчетов

Погрешность аппроксимации для числа отсчетов 150 и 200 составила менее 0,6 %.

Зависимости СКО числа сегментов $\sigma(n)$ от количества отсчетов изображения n получены для мозаик других типов и представлены в табл. 2. Линейный характер зависимости сохраняется во всех случаях. Погрешности аппроксимации для всех типов мозаик не превышают 5 %.

Таблица 2. Зависимость СКО числа сегментов от количества отсчетов

Тип мозаики	Зависимость СКО числа сегментов $\sigma(n)$ от количества отсчетов n	Относительная погрешность, %	
		при 150 отсчетах	при 200 отсчетах
<i>F</i>	$0,2822n+1,8142$	1,87	1,15
<i>FB</i>	$0,2893n-0,4766$	2,66	2,07
<i>FC</i>	$0,5661n+1,0690$	0,14	0,57
<i>FD</i>	$0,2206n+0,3159$	0,5	3,74
<i>FE</i>	$0,4005n+1,5842$	1,9	0,14

Заключение

По критерию согласия Пирсона проверена гипотеза о нормальном законе распределения числа

сегментов изображений, построенных на двумерном рекуррентном точечном потоке восстановления. Показано, что в 73 % случаев гипотеза является истинной для мозаики типа *F*, и в более 78 % — для мозаик других типов. Гипотеза не получила подтверждения для изображений небольших размеров (в 30 и 40 отсчетов). При возрастании размеров изображения распределение числа сегментов стремится к нормальному закону для мозаик всех типов.

Получены зависимости среднего числа сегментов от количества отсчетов изображений для мозаик типов *F*, *FB*, *FC*, *FD*, *FE* и установлено, что зависимость имеет квадратичный характер. Проведена аппроксимация данных зависимостей по методу наименьших квадратов. Результаты аппроксимации дают удовлетворительные результаты (погрешность менее 5 %) в случае изображений больших размерностей.

Проведена оценка поведения СКО числа сегментов от количества отсчетов изображений для мозаик типов *F*, *FB*, *FC*, *FD*, *FE*. Анализ показал, что зависимость имеет линейный характер, а погрешность аппроксимации не превышает 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. — М.: Наука, 1966. — 431 с.
2. Дубинин Д.В., Лаевский В.Е., Кочегуров А.И. Методика моделирования случайных яркостных полей, аппроксимированных однородными, одноуровневыми марковскими цепями // Проблемы информатики. — 2011. — № 4 (12). — С. 128–136.
3. Фамялия И.О. Название статьи // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Труды научно-технической конференции. Вып. 4 / под ред. Р.Р. Назирова. — М.: КДУ, 2011. — 328 с.
4. Лаевский В.Е. Алгоритм построения одноуровневых марковских полей // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309. — № 8. — С. 32–36.

5. Dubinin D., Geringer V. (Laevski V.), Kochegurov A. Eine Methode zur Erzeugung stochastischer Helligkeitsfelder durch homogene, einstufige Markoff-Ketten // Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Technisches Messen. — 2012. — № 5. — S. 271–276.
6. Yates J. Contingency table involving small numbers and the χ^2 test // Royal Statistical Society. — 1934. — V. 1. — P. 217–235.
7. Sturges H.A. The choice of a class interval // Journal of the American Statistical Association. — 1926. — № 21. — P. 65–66.

Поступила 25.09.2012 г.

УДК 621.396.969.1

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ АБОНЕНТА СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛЯ ЗА УРОВНЕМ ЗАМИРАНИЙ СИГНАЛА В КАНАЛЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Е.П. Великанова, Е.П. Ворошилин, Е.В. Рогожников

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: raliens@mail.ru, vep@tor.tusur.ru

Методом прямого статистического моделирования рассмотрено влияние неточности задания ковариационной матрицы наблюдений на погрешность оценки координат абонента, формируемой на выходе алгоритма фильтрации Калмана. Рассчитано, какой выигрыш в повышении точности оценки координат можно получить посредством контроля за изменением отношением сигнал/шум для систем связи.

Ключевые слова:

Оценка координат, расширенный фильтр Калмана, адаптивная фильтрация, ковариационная матрица наблюдений.

Key words:

Position estimation, extended Kalman filter, adaptive filter, observation noise covariance.

В процессе формирования оценки текущего местоположения абонента системы связи требуются знания о дисперсии полезных наблюдений (пеленга, момента прихода и т. п.), содержащих информацию о координатах пользователя. Шумовая погрешность этих наблюдений зависит от отношения сигнал/шум (ОСШ) и полосы сигнала. В канале распространения сигнал абонента испытывает быстрые и медленные замирания, что приводит к значительным флуктуациям ОСШ, а, следовательно, изменяется и ковариационная матрица полезных наблюдений.

Как правило, в фильтре слежения за координатами пользователя погрешность наблюдений полагается равной некоторой константе. При её заниженном или завышенном (по отношению к истинному) значении нарушается оптимальность процедуры фильтрации. Это обусловлено присвоением наблюдению неверного веса, с которым оно участвует в коррекции текущей оценки местоположения абонента.

Задача адаптации алгоритма фильтрации в условиях априорной неопределённости актуальна и широко обсуждается в литературе [1–11].

Цель представленной работы состоит в исследовании следующих вопросов:

- влияние неточности задания дисперсии наблюдений на погрешность оценки координат пользователя;
- эффективность повышения точности оценки координат посредством контроля за изменением отношением сигнал/шум с течением времени для систем связи.

Исследования проведены путем прямого численного моделирования с привлечением экспериментальных данных.

Рассмотрим задачу местоопределения абонента мобильной связи, который движется равномерно

и прямолинейно. Диапазон скоростей до 120 км/ч. Метод оценки координат – разностно-дальномерный. Интервал поступления наблюдений разностей моментов прихода – $\Delta t = 100$ мкс.

Введём следующие обозначения:

$\mathbf{x} = [x \ vx \ y \ vy \ z \ vz]^T$ – вектор состояния абонента, содержащий набор координат объекта в трехмерном пространстве: x, y, z и набор скоростей по каждой из проекций: vx, vy, vz ; $\mathbf{z} = [\Delta t_{12} \ \Delta t_{34} \ \Delta t_{23}]^T$ – вектор наблюдений: разности моментов прихода в четыре измерительных пункта (ИП). Здесь $\Delta t_{ij} = t_j - t_i$, где t_i – момент прихода сигнала в i -й ИП.

Динамика вектора состояния в дискретном времени:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{F}(k) \cdot \mathbf{x}(k-1), \quad (1)$$

где

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

– матрица перехода; Δt – временной интервал между соседними тактами обработки разностно-временных наблюдений, k – порядковый номер временного интервала.

Вектор состояния связан с вектором наблюдений следующим выражением:

$$\mathbf{z}(k) = h[\mathbf{x}(k)] + \mathbf{w}(k), \quad (2)$$

где $h(*)$ – нелинейная функция, $\mathbf{w}(k)$ – гауссовская последовательность белого шума с нулевым средним и известной ковариационной матрицей $\mathbf{R}(k)$.

$$h(\mathbf{x}(k)) = \begin{Bmatrix} \frac{\sqrt{(x(k)-x_2)^2 + (y(k)-y_2)^2 + (z(k)-z_2)^2} - \sqrt{(x(k)-x_1)^2 + (y(k)-y_1)^2 + (z(k)-z_1)^2}}{c} \\ \frac{\sqrt{(x(k)-x_4)^2 + (y(k)-y_4)^2 + (z(k)-z_4)^2} - \sqrt{(x(k)-x_3)^2 + (y(k)-y_3)^2 + (z(k)-z_3)^2}}{c} \\ \frac{\sqrt{(x(k)-x_3)^2 + (y(k)-y_3)^2 + (z(k)-z_3)^2} - \sqrt{(x(k)-x_2)^2 + (y(k)-y_2)^2 + (z(k)-z_2)^2}}{c} \end{Bmatrix}$$

где $\{x_i, y_i, z_i\}, i=1, \dots, 4$ – координаты измерительных пунктов; c – скорость света.

Матрица

$$\mathbf{R}(k) = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta 12}^2 & 0 & 0,5\sigma_{\Delta 12}\sigma_{\Delta 23} \\ 0 & \sigma_{\Delta 34}^2 & 0,5\sigma_{\Delta 34}\sigma_{\Delta 23} \\ 0,5\sigma_{\Delta 12}\sigma_{\Delta 23} & 0,5\sigma_{\Delta 34}\sigma_{\Delta 23} & \sigma_{\Delta 23}^2 \end{bmatrix}$$

где $\sigma_{\Delta ij}$ – средноквадратическое отклонение (СКО) разностей моментов прихода между i -м и j -м ИП.

При равных во всех пунктах значениях дисперсии разностно-временных измерений:

$$\mathbf{R}(k) = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta}^2 & 0 & 0,5\sigma_{\Delta}^2 \\ 0 & \sigma_{\Delta}^2 & 0,5\sigma_{\Delta}^2 \\ 0,5\sigma_{\Delta}^2 & 0,5\sigma_{\Delta}^2 & \sigma_{\Delta}^2 \end{bmatrix}$$

где $\sigma_{\Delta}^2 = 2\sigma_t^2$, σ_t^2 – дисперсия оценки момента прихода сигнала.

Поскольку наблюдения разностей моментов прихода нелинейно связаны с координатами абонента (2), а сама модель движения линейна (1), то в качестве алгоритма оценки местоположения будет выступать расширенный фильтр Калмана. Его процедура формирования оценок координат носит рекурсивный характер (рис. 1) и приведена в литературе [12, 13].

Начальными входными параметрами фильтра являются:

1. Априорная оценка вектора состояния цели $\hat{\xi}(0)$. В начальный момент времени $\hat{\xi}(0) = [x \ 0 \ y \ 0 \ z \ 0]$,

где x, y, z находим по первой тройке наблюдений разностей моментов прихода, а скорости v_x, v_y, v_z полагаем равными нулю.

2. Ковариационная матрица оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{P}}(0)$.
3. Ковариационная матрица наблюдений $\mathbf{R}(0)$.

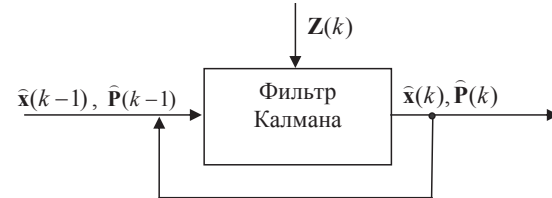


Рис. 1. Входные и выходные данные алгоритма фильтрации

Проведём исследование влияние неверного задания матрицы $\mathbf{R}(k)$ на точностные характеристики алгоритма фильтрации. Пусть СКО измерений моментов прихода σ_t постоянно в течение всего времени наблюдений за абонентом и равно 50 нс. Промоделируем работу фильтра в двух режимах, когда введённое в матрицу \mathbf{R} значение СКО измерений $\hat{\sigma}_t^\phi$ занижено и завышено по отношению к истинному ($\hat{\sigma}_t^\phi = 10$ нс и 100 нс, соответственно). Результаты моделирования для заниженного ($\hat{\sigma}_t^\phi = 10$ нс) значения СКО наблюдений моментов прихода приведены на рис. 2. Усреднение выполнено по 100 реализациям шумов.

На рис. 2 видно, что введение в фильтр заниженного относительно истинного значения СКО измерений моментов прихода сигнала приводит к ощутимому (в 1,5 раза) ухудшению точностных характеристик алгоритма в переходный период времени. В дальнейшем для большей наглядности будут приведены не абсолютные значения средней ошибки места и скорости, а нормированные (рис. 3, 4). Нормирование выполнено относительно режима, когда в фильтр вводится истинное значение дисперсии: $\hat{\sigma}_t^\phi = \sigma_t = 50$ нс. Уровень, равный единице, помечен пунктирной линией.

На рис. 3 видно, что при занижении СКО измерений на 40 нс по отношению к истинному проигрыш в точности оценки вектора состояния по координатам составил 1.3 раза, а по скорости 2.7 раз.

На рис. 4 показано, что при завышении СКО измерений в 2 раза проигрыш в точности оценки вектора состояния достиг 40 %.

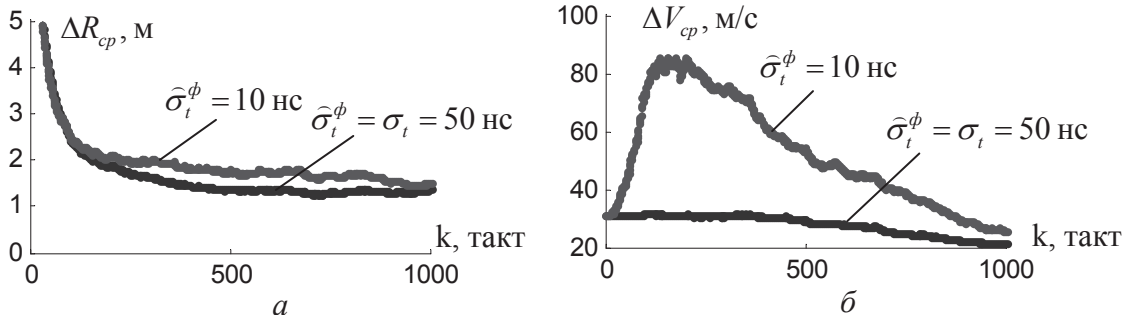


Рис. 2. Точностные характеристики алгоритма фильтрации при нормальном и заниженном значении СКО измерений: а) среднее значение ошибки места; б) среднее значение ошибки оценки скорости

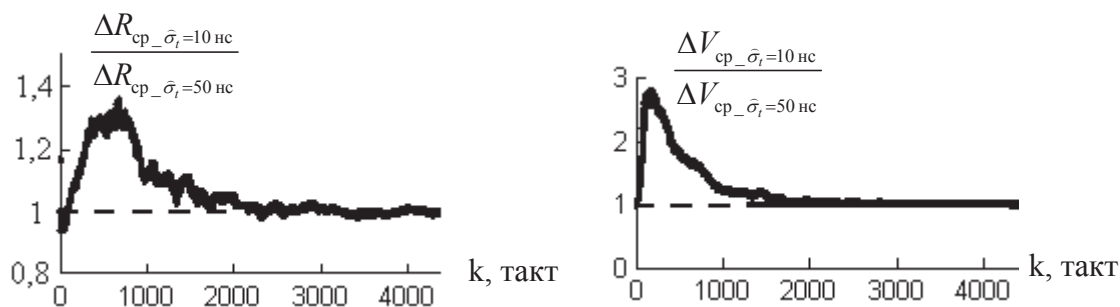


Рис. 3. Зависимость нормированной средней ошибки места и скорости при заниженном в фильтре значении СКО наблюдений: $\sigma_t^\phi = 10$ нс

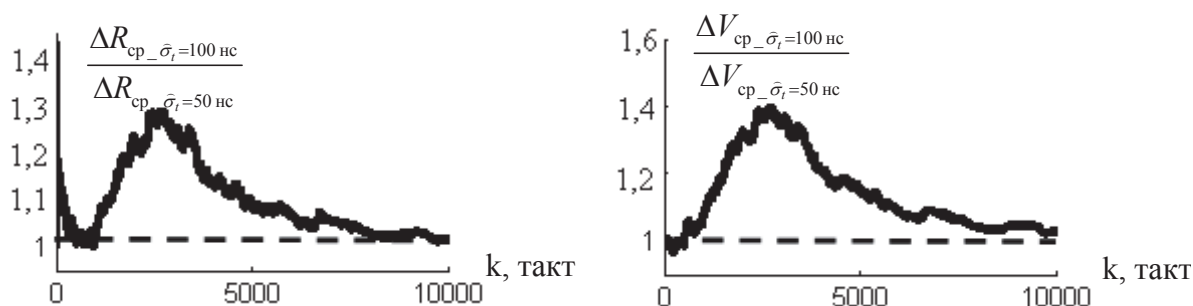


Рис. 4. Зависимость нормированной средней ошибки места и скорости при завышенном в фильтре значении СКО наблюдений: $\sigma_t^\phi = 100$ нс

Известно, что отношение сигнал/шум в фиксированный момент времени является случайной величиной, зависящей от случайных флуктуаций в канале распространения. В результате этого дисперсия измерений моментов прихода меняется с течением времени. Оценим, какой можно получить выигрыш в точности местоопределения пользователя благодаря контролю за текущим отношением сигнал/шум, а следовательно и за дисперсией поступающих измерений.

Формирование оценки времени прихода полагается выполненным оптимальным образом (с помощью корреляционного приёмника). Точность временных измерений зависит от отношения сигнал/шум, полосы сигнала и частоты дискретизации АЦП. В работе будут рассмотрены значения этих параметров, характерные для систем связи:

- ОСШ [2; 20] дБ;
- полоса сигнала $\Delta f_c = 2,5; 5$ и 10 МГц;
- частота дискретизации $f_d = 40$ МГц.

На рис. 5 приведена зависимость СКО временных измерений при разном ОСШ и полосе сигнала.

На рис. 5 видно, что с увеличением полосы сигнала и отношения сигнал/шум СКО временных измерений уменьшается.

В качестве модели флуктуаций отношения сигнал/шум во времени использовался случайный гауссовский процесс с заданной дисперсией и интервалом временной корреляции τ_k . Дисперсия определялась рассматриваемым диапазоном ОСШ (2...20 дБ), а τ_k зависела от скорости движения абонента при стационарности прочих условий в канале распространения:

$$\tau_k = \frac{0,846}{\Delta f_d} = \frac{0,846 \cdot c}{f_0 \cdot v},$$

где Δf_d – доплеровский сдвиг частоты, $f_0 = 2,7$ ГГц – несущая частота сигнала, v – скорость движения объекта; c – скорость света.

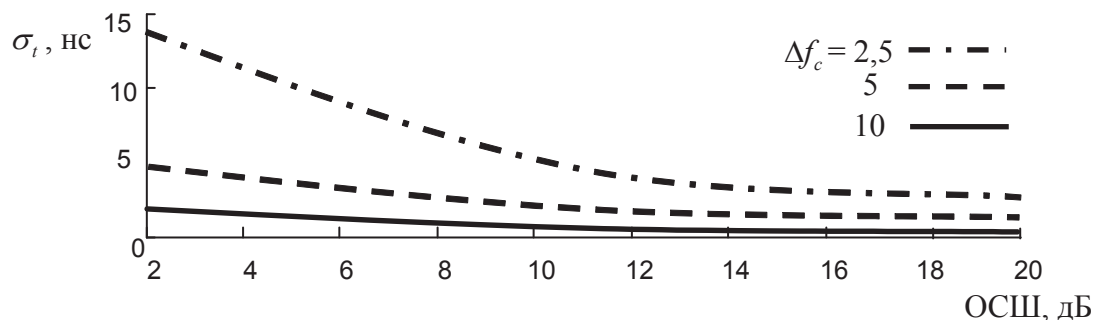


Рис. 5. Зависимость СКО ошибки оценки момента прихода от отношения сигнал шум для разной полосы сигнала (2,5; 5 и 10 МГц) при $f_d = 40$ МГц

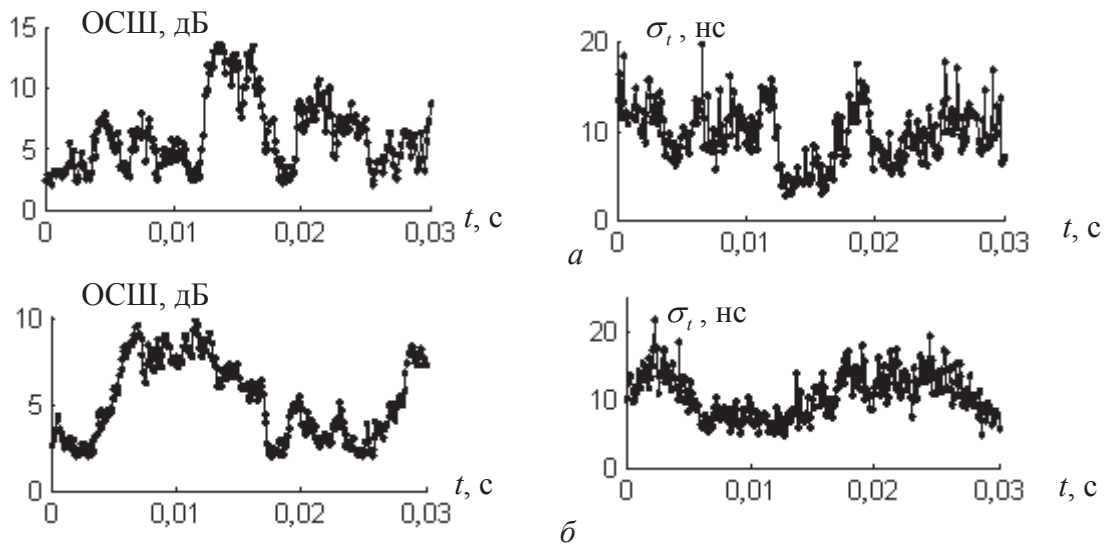


Рис. 6. Динамика изменения отношения сигнал/шум во времени и соответствующие значения СКО временных измерений при движении абонента со скоростью v а) 120; б) 20 км/ч

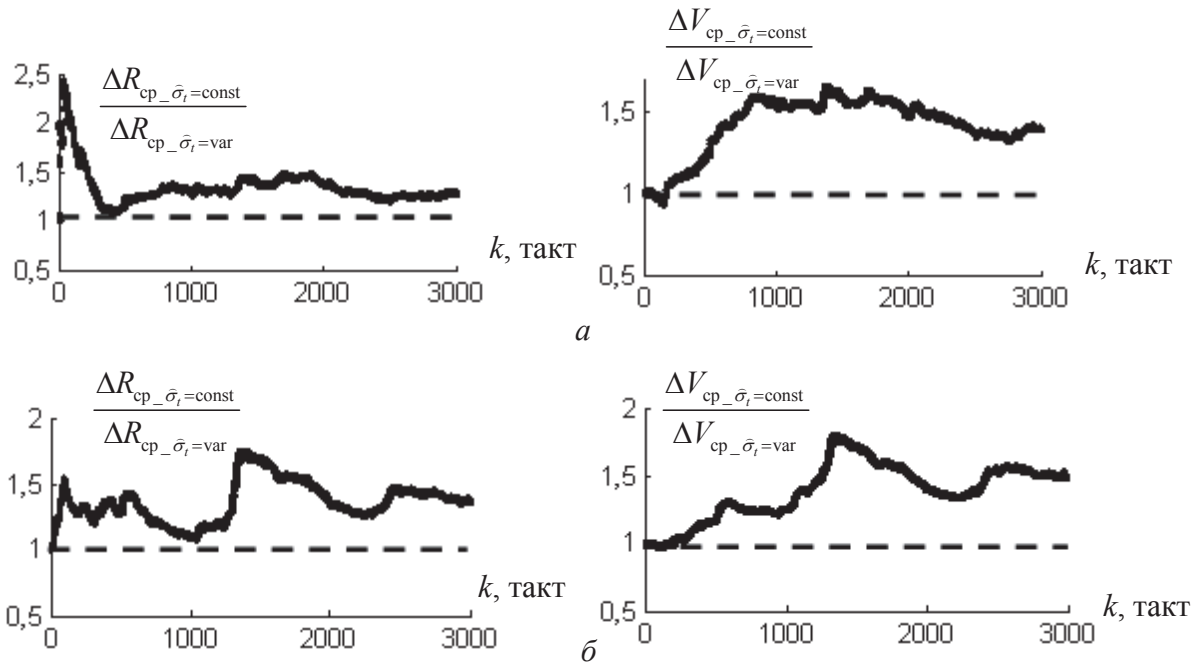


Рис. 7. Зависимость нормированной средней ошибки места и скорости от времени при движении абонента со скоростью а) 120; б) 20 км/ч

Для скоростей пользователя, равных 120 и 20 км/ч, интервал временной корреляции равен 0,0028 и 0,017 с, соответственно. Пример процесса и изменения отношения сигнал/шум и соответствующих погрешностей временных измерений для разных скоростей абонента представлен на рис. 6.

Для сравнительного анализа точности оценки координат пользователя, получаемых с учётом изменения ОСШ, а, соответственно, дисперсии наблюдений, и без него, было проведено следующее моделирование. В уравнениях алгоритма фильтрации Калмана в матрицу $\mathbf{R}(k)$ в первом случае

на каждом такте вводилось истинное значение дисперсии временных измерений $\sigma^2(k)$, а во втором оно считалось константой, равной истинному значению дисперсии в начальный момент времени (на первом такте) $\mathbf{R}(k)=\mathbf{R}(0)$. Результаты моделирования приведены на рис. 7 (усреднение выполнено по 100 реализациям шумов). На рисунках приведено нормированное значение средней ошибки места и скорости в режиме, когда дисперсия измерений считается константой. Нормирование выполнено относительно значений, когда в фильтр вводится истинное значение ковариационной матрицы, изменяющееся с течением времени.

На рис. 7 видно, что учёт изменения ОСШ во времени и соответствующий пересчёт веса текущего измерения при обновлении вектора оценки координат пользователя позволяет повысить точность в среднем в 1,5 раза. Следует отметить, что полученные результаты являются предельными и недостижимыми на практике, поскольку достоверный прогноз дисперсии временных измерений по оценке отношения сигнал/шум невозможен.

В заключение, для подтверждения полученных выводов, приведём результат аналогичных исследований, выполненных на реальных экспериментальных данных. Эксперимент проводился в городской среде. Приёмная аппаратура была размещена на подвижном носителе, который двигался со скоростью 20 и 50 км/ч. Рассматривались два типа трасс: короткая (100...500 м) и протяжённая (1...2 км). Для исследования использовался OFDM сигнал полосой 20 МГц и длительностью 100 мкс на несущей частоте 2,4 ГГц. Регистрация и запись квадратур сигнала в ЭВМ проводилась в течение одной минуты. Полученные зависимости флуктуации мощности принимаемого сигнала от времени

приведены на рис. 8. Уровень шума был в районе -70 дБм. Интервал между соседними наблюдениями составлял 0,028 с.

Оценка выигрыша в точности местоопределения, которую может дать контроль за уровнем сигнала, выполненная на экспериментальных данных приведена на рис. 9.

На рис. 9, а, видно, что на начальном этапе, когда реальное значение СКО наблюдения не сильно отличается от принятого в алгоритме, уточнение ковариации не приносит видимых результатов. Однако, начиная с 400-го такта, когда наблюдается резкое возрастание ОСШ (рис. 8, а), точность местоопределения начинает расти и увеличивается в среднем на 30 %.

Заключение

Дисперсия измеряемой величины, несущей информацию о координатах пользователя, непосредственно участвует в уравнениях фильтрации его координат. Её завышенное или заниженное (по сравнению с истинным) значение приводит к ухудшению точностных характеристик алгоритма место-

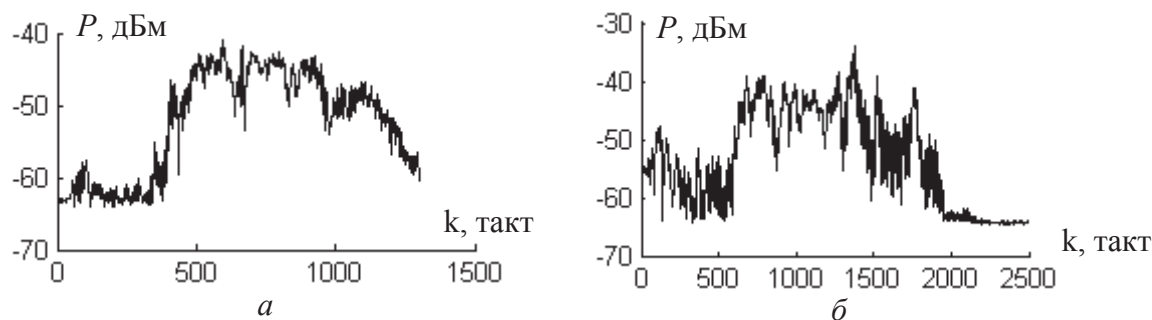


Рис. 8. Экспериментальная запись мощности принимаемого сигнала с течением времени. Трасса: а) короткая; б) длинная

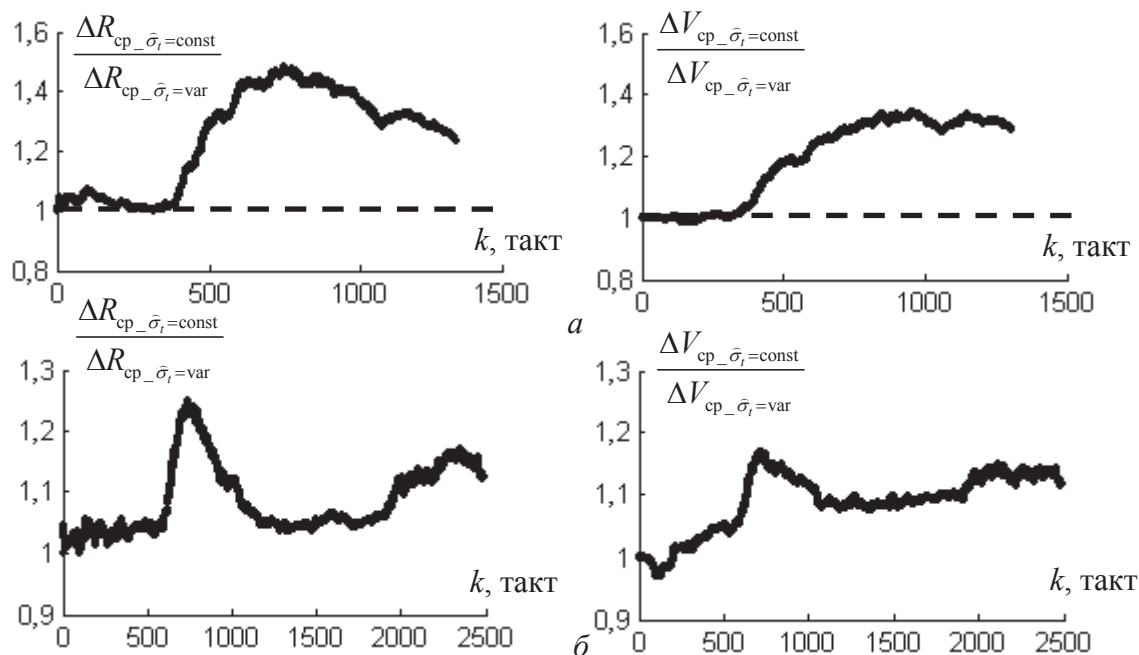


Рис. 9. Зависимость нормированной средней ошибки места и скорости от времени по экспериментальным данным. Трасса: а) короткая; б) длинная

определения. Это обусловлено неправильным распределением веса (вклада) предыдущей оценки вектора состояния и текущего измерения при обновлении оценки координат пользователя. Моделирование показало, что при завышенной в 2 раза погрешности задания СКО измерений (по отношению к истинной), проигрыш в точности оценки вектора состояния достигает 40 %.

На практике зачастую оценивают дисперсию измерений экспериментально (непосредственно по поступающим наблюдениям), а далее полагают её равной константе. В действительности же отношение сигнал/шум меняется во времени и представляет со-

бой случайный коррелированный процесс. Поэтому учёт изменения дисперсии наблюдений остаётся актуальным. В работе по экспериментальным данным для систем связи показано, что слежение за относительным уровнем сигнала и шума, а соответственно, и за дисперсией наблюдений позволяет снизить погрешность местоопределения в среднем на 30 %.

Полученные результаты носят теоретический характер, но имеют практическую значимость, поскольку дают информацию о степени возможного выигрыша в точности местоопределения за счёт контроля за уровнем замираний сигнала в канале распространения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Понятский В.М. Исследование способов реализации адаптивной системы управления с фильтром Калмана // Интернет. 2008. URL: http://www.math.spbu.ru/user/gran/soi4/ponyatskiy08_2.pdf (дата обращения: 05.04.2012).
2. Згуровский М.З., Подладчиков В.Н. Аналитические методы калмановской фильтрации для систем с априорной неопределенностью. – К.: Наукова думка, 1995. – 298 с.
3. Забегаев А.Н., Павловский В.Е. Адаптация фильтра Калмана для использования с локальной и глобальной системами навигации // Интернет. 2009. URL: <http://www.raai.org/resurs/papers/kii-2010/doklad/zabegaev.pdf> (дата обращения: 08.05.2012).
4. Дегтярёв А.А., Тайл Ш. Элементы теории адаптивного расширенного фильтра Калмана // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – М.: Связь, 2003. – № 26. – 35 с.
5. Sung W.J., Choi S.O., You K.H. TDoA based UGV Localization using Adaptive Kalman Filter Algorithm // Интернет. 2009. URL: http://www.sersc.org/journals/IJCA/vol2_no1/1.pdf (дата обращения: 18.04.2012).
6. Xiong K., Zhang H., Liu L. Adaptive Robust Extended Kalman Filter // Интернет. 2009. URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/6327/InTech-Adaptive_robust_extended_kalman_filter.pdf (дата обращения: 18.04.2012).
7. Jwo D.-J., Chung F.-C. Adaptive Kalman filter for navigation sensor fusion // Интернет. 2009. URL: <http://ebookbrowse.com/gdoc.php?id=326155547&url=0761dcbcc180093566925b023b9f88e7> (дата обращения: 18.04.2012).
8. Mohamed A.H., Schwarz K.P. Adaptive Kalman filtering for INS/GPS // Интернет. 1999. URL: http://www.sfric.ufl.edu/nagem/docs/refereed_journals/Mohamed%20and%20Schwarz%20%201999%20-%20Adaptive%20Kalman%20filtering%20for%20INS/GPS.pdf (дата обращения: 18.04.2012).
9. Jwo D.-J., Chen M.-Y. Adaptive and Nonlinear Kalman filtering for GPS Navigation Processing // Интернет. 2008. URL: <http://ebookbrowse.com/gdoc.php?id=311579672&url=c5a49d3355e2ccacdc99067238c9cdf> (дата обращения: 18.04.2012).
10. Moriya N. Non-Stationary noise estimation in Adaptive Linear and Extended Kalman Filtering // Интернет. 2007. URL: <http://ebookbrowse.com/gdoc.php?id=238899060&url=e26036679ab305cc1c49cbfc118de255> (дата обращения: 18.04.2012).
11. Kim S.-J., Iltis R.A. STAP for GPS Receiver Synchronization // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 2004. – V. 40. – № 1. – P. 132–144.
12. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. – М.: Радио и связь, 1993. – 319 с.
13. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Пер. с англ. под ред. Б.Р. Левина. – М.: Связь, 1976. – 495 с.

Поступила 26.07.2012 г.

СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В.Б. Немировский, А.К. Стоянов

Томский политехнический университет
E-mail: stoj-ak@ad.cctpu.edu.ru; nemir-vb@ad.cctpu.edu.ru

Рассматривается возможность применения одномерного точечного отображения для сегментации изображений. В связи с сегментацией обсуждаются вопросы расчёта параметров нейронов рекуррентной сети, реализующей такое отображения. Приводятся результаты экспериментов по многошаговой сегментации.

Ключевые слова:

Изображение, пиксель, точечные отображения, неподвижные точки, сегментация.

Key words:

Image, pixel, point map, critical point, segmentation.

Введение

Для решения различных задач обработки изображений широко используется их сегментация. Под сегментацией понимается разбиение изображения на ряд областей со схожими характеристиками пикселей. Результатом является множество сегментов (областей), полностью покрывающих исходное изображение. Предполагается, что области соответствуют реальным объектам (или их частям).

Методы сегментации можно разделить на два класса: автоматические – не требующие взаимодействия с пользователем и интерактивные – позволяющие пользовательский ввод непосредственно в процессе работы [1, 2]. В статье рассматривается разработка метода сегментации, относящегося к первому классу. Методы этого класса делятся на две категории [1–3]: методы, базирующиеся на информации либо о контурах, либо об областях.

Методы первой категории используют для сегментации априорную информацию о контурах объектов [2], которая всегда есть в задачах анализа сцен, поиска объектов на изображении и некоторых других задачах. Методы этой группы узко специализированы для каждой конкретной задачи и не являются объектом нашего интереса.

Методы второй категории делят изображение на области в соответствии с совпадением некоторых характеристик пикселей изображения (интенсивности, цветовых каналов, текстуры и т. д.) [3, 4]. При этом априорная информация о свойствах областей отсутствует, но на само разбиение изображения накладываются некоторые условия (например, однородность областей по яркости или цвету). Методы сегментации, относящиеся к этой категории, универсальны и применимы к любым изображениям. Существует большое количество методов сегментации, использующих разные подходы к формированию однородных областей [1]. Одним из распространенных подходов является применение для этих целей кластеризации (различные модификации метода k -средних [2, 5]). Отметим, что основной проблемой применения метода k -средних является необходимость наличия априорной

информации для выбора числа кластеров [2, 4, 5], что ограничивает широкое использование кластеризации для сегментации изображений.

Таким образом, существует потребность в разработке методов сегментации изображений, основанных на кластеризации, и свободных от указанного выше недостатка. Таким решением этой задачи может быть использование кластеризации, осуществляемой нейронной сетью. Использование для кластеризации рекуррентной нейронной сети [6] не требует (в отличие от k -средних) никакой предварительной информации о числе кластеров. Кроме того, достоинствами любой искусственной нейронной сети является распределенная параллельная обработка информации, способность к самонастройке и подавлению шумов.

Целью данной работы является исследование возможности применения кластеризации, выполняемой рекуррентной нейронной сетью, и разработка на основе этого исследования метода сегментации полутоновых изображений.

Кластеризация значений на одном нейроне

Для кластеризации множества M -мерных данных рекуррентной нейронной сетью в состав входного слоя сети включают M нейронов. Каждый нейрон обрабатывает все значения какого-то одного из M признаков, характеризующих вектор данных из исходного множества [6]. Отдельное значение одного такого признака является входным сигналом для нейрона. В рассматриваемой нами рекуррентной сети для каждого входного нейрона вводится локальная обратная связь, соединяющая выход нейрона с его входом. Эта обратная связь реализует процесс одномерного отображения величины x входного сигнала на активационной функции нейрона, которая описывается выражением

$$f(x) = \frac{\mu}{1 + \exp(-\alpha x + \beta)}, \quad (1)$$

где α – коэффициент наклона; $\alpha > 0$, β – величина смещения; μ – коэффициент увеличения, $\mu > 0$. Одномерное отображение величины x входного сигнала на активационной функции описывается ите-

рациональным соотношением $x_{n+1}=f(x_n)$, где $n=1,2,3\dots$ – номер итерации. После нескольких итераций отображаемая величина сигнала достигает устойчивой неподвижной точки, значение которой x^* определяется из нелинейного уравнения $f(x^*)=x^*$. В численных расчётах значение x^* определяется с некоторой заданной точностью ε .

Динамика работы такого нейрона проанализирована в [6], и мы не будем касаться подробностей. Отметим лишь те из деталей анализа, которые проясняют механизм кластеризации для некоторого множества M -мерных данных.

Для кластеризации параметры α и β выбирают так, чтобы диапазон величин всех входных сигналов $[x_{\min}, x_{\max}]$, отображаемых на одном нейроне, располагался между значениями неустойчивой точки отображения x_1^* и одной из двух устойчивых точек x_2^* . Процесс отображения разбивает диапазон величин входных сигналов на ряд интервалов. Интервалы обладают следующими свойствами: величины, принадлежащие одному интервалу, в результате отображения сходятся к устойчивой точке x_2^* за одно и то же число итераций. Таким образом, величины входных сигналов группируются по степени их близости. Мерой близости является количество итераций, нужное для достижения устойчивой точки с заданной степенью точности ε . Точки, попавшие в один интервал, относятся, согласно выбранной мере, к одному кластеру. Таким образом, каждый из входных нейронов кластеризует множество значений одного из M признаков исходных данных. Вся же сеть в целом выделяет кластеры во всех признаках, что и даёт возможность кластеризации элементов множества M -мерных данных.

В рассматриваемой сети возможен расчёт параметров активационной функции отдельного нейрона. Он основан на том, что при отображении любого значения на некоторой функции неподвижные (устойчивые и неустойчивые) точки лежат на пересечении графика функции и биссектрисы прямого угла [7]. В нашем случае такой функцией является сигмоида, которая описывается ур. (1), и её параметры α и β можно получить, решая систему уравнений

$$x_i^* = f(x_i^*, \alpha, \beta, \mu), \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Значения x_i^* связаны со значениями границ диапазона $[x_{\min}, x_{\max}]$ соотношениями $x_1^* = x_{\min} - \delta_1$ и $x_2^* = x_{\max} + \delta_2$, где $|\delta_1| \ll 1$ и $|\delta_2| \ll 1$. Система уравнений (2) решается относительно α и β лишь в случае, если коэффициент увеличения μ задан заранее. В предположении известности μ решение системы (2) имеет вид:

$$\alpha = \frac{1}{x_2^* - x_1^*} \ln \left(\frac{(\mu - x_1^*)x_2^*}{(\mu - x_2^*)x_1^*} \right),$$

$$\beta = \alpha x_1^* + \ln \left(\frac{\mu - x_1^*}{x_1^*} \right). \quad (3)$$

Очевидно, что любое изменение μ управляет значениями α и β , и, следовательно, меняет форму

активационной функции, оставляя неизменными положения неустойчивой и устойчивой точек отображения. В свою очередь, параметры α и β определяют условия сходимости отображения входных значений, что, в конечном счете, и создаёт возможность управления процессом кластеризации данных.

Экспериментально было установлено [6], что наилучшая кластеризация входных значений одного нейрона наступает при значении μ , которое находится в окрестности $\max|\Delta H|$, где ΔH – изменение энтропии, соответствующее изменению μ . Энтропия отображения H подсчитывается для данного μ по формуле Шеннона

$$H = - \sum_i p_i \log_2 p_i.$$

Здесь $p_i = N_i/N$; N_i – количество значений входного сигнала, входящих в i -й кластер (т. е. множество значений соответствующего признака, сходящихся к устойчивой точке за одно и то же число итераций); N – общее количество всех значений сигнала. Суммирование ведётся по количеству кластеров, образовавшихся при отображении на активационной функции с параметрами α и β , соответствующими текущему значению μ . Смысл критерия выбора μ становится понятным, если вспомнить, что энтропия даёт нам среднее значение информации, приходящееся на один элемент изучаемой системы (в нашем случае таким элементом является любой заполненный из образовавшихся кластеров). Следовательно, $\max|\Delta H|$ показывает наибольший прирост средней информации на один кластер, получаемый за счёт изменения значения μ . Поскольку энтропия H связана со степенью хаотичности системы, то этот прирост обусловлен переходом системы из менее упорядоченного состояния в более упорядоченное. Зная значения μ , соответствующие такому переходу, можно выбрать то из них, которое приводит к большей упорядоченности отображения, то есть лучшему (при данном выборе параметров α и β) набору кластеров.

Многошаговая сегментация

Будем считать, что исходное изображение представлено в полутоновой серой шкале. Выделение однородных по яркости областей (сегментация) в этом случае фактически сводится к кластеризации значений всего одной характеристики (признака) – яркости. Это означает, что обработка всего изображения может осуществляться в рекуррентной сети с одним входным нейроном ($M=1$). В то же время обычное представление изображения – двумерная матрица. Такое представление естественным образом предполагает использование сети со многими входами ($M>1$) для распараллеливания процесса обработки. Применение такой рекуррентной сети для кластеризации в нашем случае возможно, если модифицировать сеть, рассмотренную в [6], таким образом, чтобы у всех нейронов входного слоя была бы одна и та же ак-

тивационная функция с одинаковыми значениями параметров. Тогда обработка всех яркостей изображения входным слоем сети математически будет эквивалентна их обработке на одном нейроне, что можно использовать при программном моделировании сети. Параметры α и β активационной функции этого нейрона определяются по методике, описанной в предыдущем разделе. Границам диапазона значений входных сигналов нейрона $[x_{\min}, x_{\max}]$ соответствует минимальная и максимальная яркости пикселей изображения. На основе этих граничных значений по формулам (3) вычисляются α и β .

Сам процесс сегментации, рассматриваемый в этой статье, требует некоторых дополнительных пояснений, приведённых ниже.

Пусть μ меняется дискретно от μ_0 до некоторого $\mu_{\text{конеч}}$. Из ур. (3) ясно, что $\mu_0 > x_2^* > x_1^*$. Каждому значению $\mu_i \in [\mu_0, \mu_{\text{конеч}}]$, $i=1, 2, \dots$ при отображении соответствует своя последовательность итераций, разбивающая диапазон яркостей изображения на ряд интервалов с одинаковыми свойствами (т. е. кластеров). В зависимости от распределения значений яркостей, часть этих интервалов заполнится, а часть останется пустыми. В целом, всей совокупности значений μ_i соответствует некоторое конечное множество разбиений диапазона.

Процесс кластеризации предполагает нахождение оптимального по некоторому критерию значения $\mu_{\text{опт}}$, которое обеспечивает наилучшее выделение кластеров. Пусть таким критерием является $\max|\Delta H|$ энтропии распределения, получаемого в результате отображения, разбивающего диапазон яркостей на ряд кластеров. Тогда полученное разбиение обеспечивает максимальную упорядоченность распределения яркостей изображения для данного $\mu_{\text{опт}}$ по всем выделенным кластерам. Выполним теперь для каждого заполненного кластера следующую процедуру – усредним его яркости и полученным средним заменим все значения, входящие в кластер. Энтропия распределения не изменится, а результатом будет сегментированное изображение, поскольку в нём множество разных исходных яркостей пикселей разделено на несколько подмножеств, объединяющих в себе близкие яркости пикселей.

Повторим описанный выше процесс кластеризации для нового распределения яркостей после усреднения. Для этого распределения нужно искать новое $\mu_{\text{опт}}$. Действительно, для некоторого μ в повторном процессе разбиения может быть кластер, включающий в себя, по крайней мере, два или более значения яркости нового распределения. Это означает, что возможно объединение яркостей для этого кластера, т. е. дальнейшее упорядочивание распределения яркостей.

На рис. 1, а, схематично представлено распределение значений яркости изображения для $\mu_{\text{опт}}$ до их усреднения в пределах кластера (верхняя часть рис. 1, а) и после усреднения с последующей заменой всех текущих значений кластера (нижняя часть рис. 1, а). Энтропия в обоих случаях неизменна и равна 1,89 бита. На рис. 1, б, представлено распределение для некоторого значения $\mu_i \neq \mu_{\text{опт}}$ при повторном процессе. Энтропия, соответственно, равна 1,24 бита. Иными словами, новое распределение более упорядочено.

Таким образом, используя последовательно в роли исходного изображения результат предыдущей его сегментации, можно получить ряд сегментированных изображений с последовательно снижающейся энтропией. Назовём такой процесс многошаговой сегментацией изображения. При этом энтропия изображения может служить критерием качества сегментации.

При реализации многошагового процесса возникает вопрос о его сходимости к устойчивому сегментированному изображению (энтропия которого не меняется). Ответ на этот вопрос дали экспериментальные исследования.

Экспериментальные результаты

Для проверки возможности получения сегментации в многошаговом процессе были проведены экспериментальные исследования на основе созданной программы, реализующей описанный выше алгоритм. Исследования проводились на полутоновых изображениях (серая шкала).

Яркости X_i i -го пикселя изображения приводились к диапазону $[\gamma_1, \gamma_1 + \gamma_2]$ использованием линейной нормировки (числа γ_1 и γ_2 лежат в единичном интервале; яркости изображения X_{\min} и X_{\max} не равны):

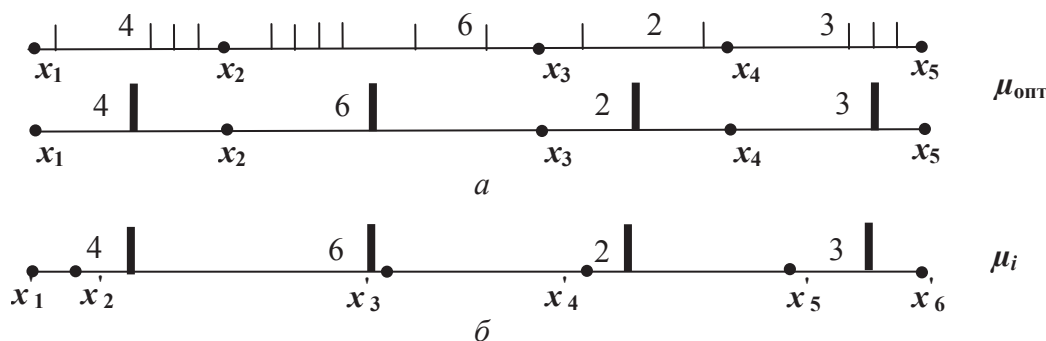


Рис. 1. Распределение значений яркостей по кластерам для разных μ . Цифрами указано количество значений, попавших в интервал $[x_k, x_{k+1}]$, $k=1, 2, \dots, 5$

$$x_i = \gamma_2 \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} + \gamma_1.$$

Здесь x_i – приведённое значение яркости пикселя. В эксперименте для нормировки использовались значения $\gamma_1=0,025$; $\gamma_2=0,20$ в одном варианте и $\gamma_1=0,01$; $\gamma_2=0,20$ – в другом. Затем в изображении отыскивались минимальное и максимальное значения нормированных яркостей пикселей, которые использовались для определения параметров α и β . Значения α и β определялись для заданного μ в соответствии с (3). Значение μ последовательно задавалось в диапазоне $x_{\max} + h < \mu \leq 1$ с постоянным шагом h . Для каждого μ подсчитывалась энтропия H распределения яркостей изображения. Таким образом, получалась последовательность значений энтропии, зависящая от величины μ , в которой затем определялся $\max|\Delta H|$. Величина μ_0 , соответствующая найденному максимуму, использовалась в дальнейшем для определения границ кластеров в яркостях пикселей изображения.

В соответствии с описанными выше особенностями процесса сегментации далее яркости пикселей изображения группировались по выделенным

кластерам, после чего близкие яркости, попавшие в один кластер, заменялись средним значением всех яркостей по этому кластеру. Таким образом, уменьшалось количество градаций яркости по сравнению с их числом в исходном изображении. Преобразованная шкала градаций использовалась для формирования матрицы пикселей нового изображения. Описанная последовательность действий выполнялась до тех пор, пока энтропия для нового изображения, полученного на очередном текущем шаге процесса, не становилась равной энтропии изображения, исходного для этого шага.

На рис. 2 и 3 приведены результаты, иллюстрирующие процесс многошаговой сегментации для разных изображений и условий нормировки яркостей пикселей.

Хорошо видно, что результаты отдельных шагов сегментации дают дополнительную информацию об объектах обрабатываемого изображения, позволяя, в зависимости от задачи, изучить структуру этих объектов с различной степенью детализации. Вид сегментированного изображения определяется тем шагом процесса, на котором оно было получено, и слабо зависит от условий нормировки ярко-

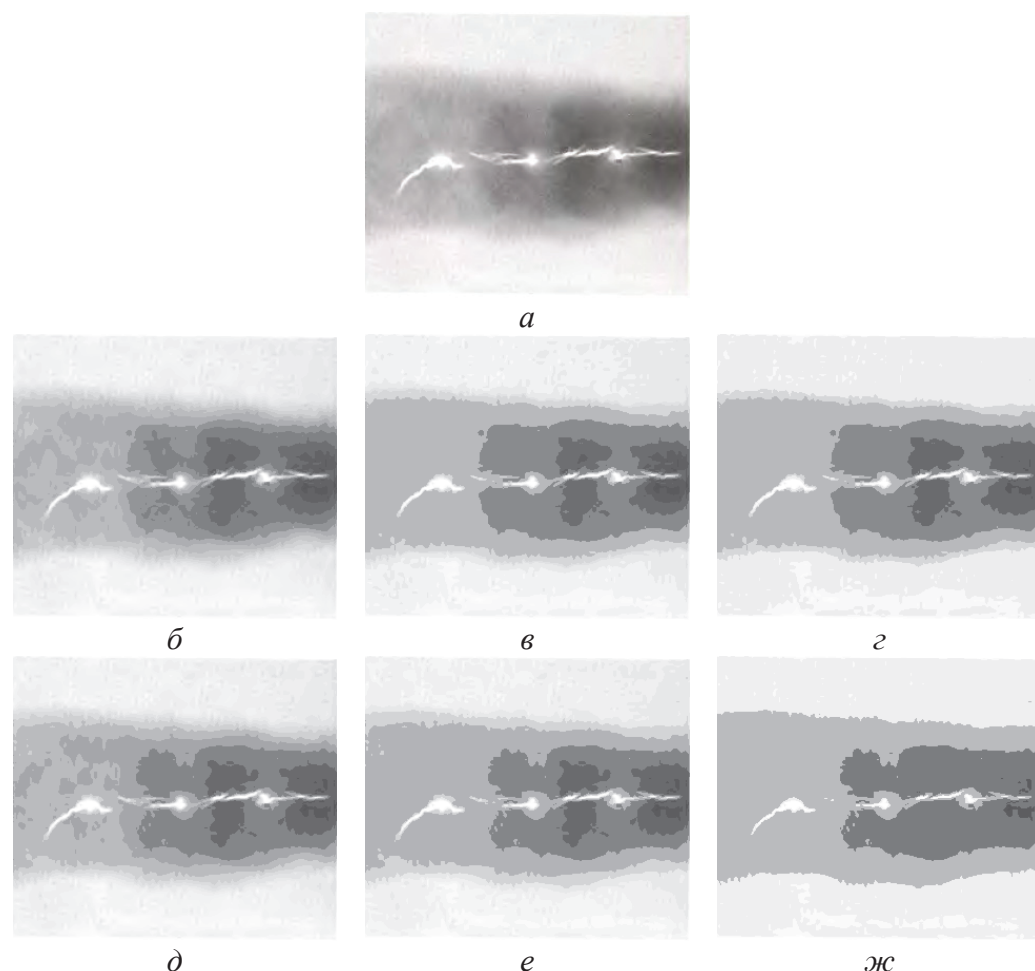


Рис. 2. Многошаговая сегментация рентгенограммы сварного шва: а) исходное изображение, взятое из [1]; б) шаг 1, $H=4,31$ бита; в) шаг 4, $H=2,92$ бита; г) шаг 6, $H=2,41$ бита; ($\gamma_1=0,200$, $\gamma_2=0,025$) д) шаг 1, $H=3,76$ бита; е) шаг 3, $H=2,92$ бита; ж) шаг 7, $H=1,86$ бита ($\gamma_1=0,20$, $\gamma_2=0,01$)

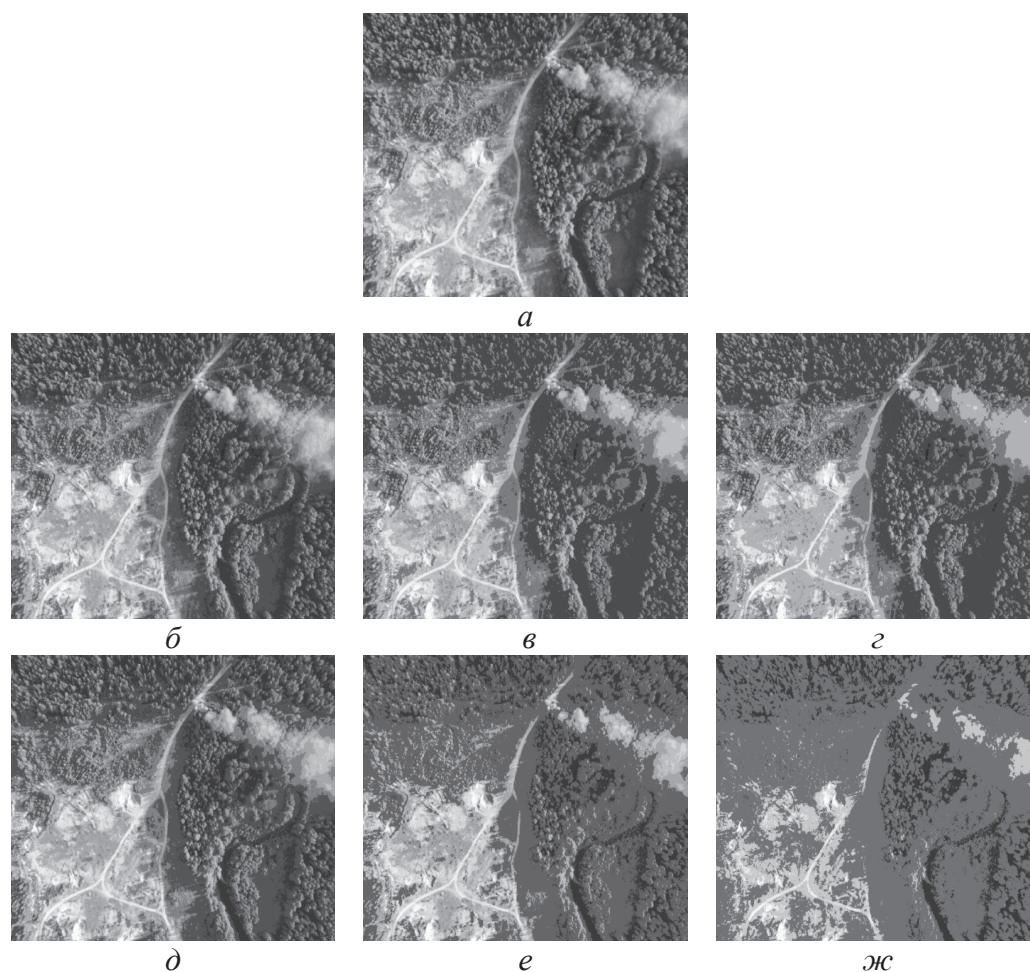


Рис. 3. Многошаговая сегментация аэрофотоснимка лесного пожара: а) исходное изображение; б) шаг 1, $H=3,05$ бита; в) шаг 2, $H=2,10$ бита; г) шаг 3, $H=1,87$ бита; ($\gamma_1=0,200$, $\gamma_2=0,025$) д) шаг 1, $H=2,53$ бита; е) шаг 2, $H=1,87$ бита; ж) шаг 3, $H=1,20$ бита ($\gamma_1=0,20$, $\gamma_2=0,01$)

стей исходного изображения. В этом легко убедиться, сравнивая изображения с одинаковой энтропией (рис. 2, в и е).

Многошаговая сегментация завершается при условии равенства энтропий изображений предыдущего и текущего шагов процесса. Шаг завершения сегментации в эксперименте был равен 8 для рентгенограммы и 6 для аэрофотоснимка. Причём на последних шагах сегментированные изображения в каждом из рассмотренных случаев визуально почти не различались, несмотря на разные значения их энтропии.

Таким образом, многошаговая сегментация может быть использована для изучения с различной степенью детализации структуры объекта, представленного на исходном изображении.

Выводы

1. Рекуррентная нейронная сеть, основанная на одномерных отображениях, позволяет выделить в изображении кластеры близких значений яркости, что даёт возможность сегментировать изображение. Используя многошаговый

процесс сегментации, можно получить сегментированное изображение с энтропией, минимально возможной для данного распределения исходных яркостей.

2. Экспериментально показано уменьшение энтропии распределения яркостей на каждом шаге сегментации и сходимости многошаговой сегментации за конечное число шагов при четко выраженном выделении сегментов изображения. Результат сегментации зависит только от параметров линейной нормировки диапазона яркостей изображения на единичный диапазон.
3. Обработанные изображения одного и того же объекта, обладающие равной энтропией при разных параметрах одномерного отображения, визуально слабо различаются.
4. Установлено, что параметры нейрона входного слоя, обеспечивающие отображение входных значений яркости и успешную их сегментацию, можно рассчитать.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Skarbek W., Koschan A. Colour image segmentation – a survey // Techn. Rep. 94–32. – Technical University Berlin, 1994. URL: <http://iristown.engr.utk.edu/~koschan/paper/coseg.pdf> (дата обращения: 09.04.2012).
3. Malik J., Belongie S., Leung T., Shi J. Contour and texture analysis for image segmentation // International Journal of Computer Vision. – 2001. – V. 43. – № 1. – P. 7–27.
4. Форсайт Д., Поппе Д. Компьютерное зрение. Современный подход. – М.: Вильямс, 2004. – 928 с.
5. Lucchese L., Mitra S. Color image segmentation: A state-of-the-art survey // Proc. of the Indian National Science Academy (INSA-A). – 2001. – V. 67. – № 2. – P. 207–221.
6. Стоянов А.К. Применение рекуррентной нейронной сети для решения задачи кластеризации // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 144–149.
7. Малинецкий Г.Г. Математические основы синергетики. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 312 с.

Поступила 11.04.2012 г.

УДК 004.652.8:004.825

ДИАГНОСТИКА МОДЕЛЕЙ БАЗ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПРОДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

А.А. Мицель, В.Д. Сибилев, И.А. Красиков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: Krasikov86@sibmail.com

Представлена логическая структура и механизм работы проектируемой автоматизированной системы проверки моделей баз данных. Приведена формализация базы знаний продукционной системы искусственного интеллекта, используемая в синтаксическом анализе моделей баз данных. Рассмотрены примеры логического вывода на основе знаний, представленных в формализованной базе знаний продукционной системы искусственного интеллекта.

Ключевые слова:

База данных, синтаксические ошибки, семантические ошибки, логическая модель, метаданные, модель «сущность–связь», продукционная система, база знаний, правило-продукция.

Key words:

Database, syntax errors, semantic errors, logic model, metadata, model «entity–relationship», production system, knowledge base, rule-production.

Введение

Диагностика моделей баз данных на сегодняшний день является одной из важнейших задач, стоящих перед проектировщиком баз данных (БД), от выполнения которой зависит будущее всей разрабатываемой информационной системы. Процесс проектирования модели БД представляет собой логически сложную, трудоемкую задачу, требующую от проектировщика знания семантического моделирования БД и навыков в работе с инструментальными средствами построения моделей БД, называемых CASE-системами (Computer Aided Software/System Engineering).

В настоящее время специалистов в области проектирования БД готовят практически во всех вузах и иных учебных заведениях нашей страны, однако уровень знаний выпускаемых специалистов в данной области зачастую оставляет желать лучшего. Низкий уровень знаний проектировщиков БД проявляется в отсутствии навыка выделять объекты описываемой предметной области (ПО), формулировать законы взаимодействия объектов ПО друг с другом, строить на их основе модели БД, которые в конечном итоге сводятся к физическим БД. В таких моделях БД зачастую наблюдаются

различного рода аномалии обновления данных, их избыточность, потеря данных, либо в БД могут иметь место данные, не несущие никакой смысловой нагрузки. Перечисленные ошибки относятся к так называемым ошибкам нормализации БД, которые можно не допускать на этапе построения модели БД, владея методологией построения моделей БД и соблюдая применяемые к ним правила нормализации. В проектировании БД принят стандарт IDEF1X, который широко используется, начиная с 1993 г. и по сегодняшний день [1]. В стандарте IDEF1X четко и однозначно описаны все синтаксические правила построения моделей БД, на которых базируется большинство CASE-систем, однако знания методологии IDEF1X для успешного построения схем БД недостаточно, проектировщику необходимо также выявлять все функциональные зависимости (ФЗ) сущностей, вытекающие из делового регламента описываемой ПО. Правила нормализации БД, подробно описанные в книге [2], могли бы помочь студентам избежать большинства ошибок еще на этапе проектирования модели БД.

Данная статья является продолжением работ [3, 4], в которых:

- приведены основные проблемы, с которыми сталкиваются как студенты, занимающиеся выполнением курсовых работ по дисциплине «Базы данных», так и преподаватель, выполняющий проверку студенческих курсовых работ;
- изложены причины, по которым использование существующих на сегодняшний день CASE-систем нежелательно в учебном процессе;
- предложена концепция автоматизированной системы управления курсовым проектированием (АСУКП) по дисциплине «Базы данных», основной задачей которой является обучение студентов навыкам семантического моделирования баз данных с использованием методологии IDEF1X (Integration DEFINitions 1 eXpanded);
- предложена концептуальная модель автоматизированной системы проверки курсовых работ (АСПК), являющаяся подсистемой АСУКП. Задачей АСПК является проверка синтаксической правильности IDEF1X диаграмм и установление их соответствия требованиям нормализации. Основной целью АСПК является снятие с преподавателя большей части аудиторной нагрузки, уходящей на проверку IDEF1X диаграмм логических моделей баз данных (БД), выполненных студентами;

Проектируемая АСПК ориентирована на контроль знаний студентов по дисциплине базы данных, обучающихся по дистанционной технологии. Несмотря на то, что в настоящее время существует множество компьютерных систем контроля знаний (СКЗ), основывающихся на тестировании студентов по различным дисциплинам, к числу которых относится и дисциплина базы данных: ЦКТ, АСТ, WITS, CALAT, TeachLab, PROUST, LISP-Tutor, а так же веб система обучения Moodle [5], функционально они отличаются от АСПК, поскольку критерием оценки знаний студентов в данных системах является анализ ответов на задаваемые системой тестовые вопросы, а не проверка правильности практических работ студентов, основанных на построении схем БД.

Существуют также системы визуального проектирования БД, именуемые CASE-системами, к которым относятся Erwin, Vantage Team Builder, S-Designor, DataBase Designer, Design/IDEF, Designer/2000, Silverrun и PRO-IV [6]. С помощью CASE-систем можно строить схемы БД в различных графических нотациях, однако данные системы ориентированы, в первую очередь, на профессионального проектировщика БД, а не на студента. В связи с этим их использование в учебном процессе нежелательно. Кроме того, с помощью существующих на сегодняшний день CASE-систем невозможно выполнить синтаксический анализ и проверку на нормализацию построенных схем БД [7]. Но стоит отметить инструмент моделирования данных ERwin Examiner, позволяющий проверять построенные в Erwin Data Modeler схемы

БД [8], однако в данной среде присутствует автоматическая поддержка синтаксиса графической нотации IDEF1X построения схем БД, что позволяет студенту выполнять синтаксически правильные схемы БД, не зная методологии IDEF1X.

Компонентами логической модели БД являются: словарь (гlossарий) предметной области, содержащий определения сущностей, атрибутов и доменов, трехуровневая IDEF1X диаграмма пользовательских данных, состоящая из ER (Entity-Relation), KB (Key Based), FA (Full Attributes) уровней детализации предметной области [9].

Целью данной работы является выявление ключевых моментов в диагностике моделей баз данных и рассмотрение возможности диагностирования моделей баз данных с помощью АСПК. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи, касающиеся АСПК:

- рассмотреть ключевые моменты в проверке логической модели БД преподавателем и найти их схожесть с процессом автоматизированной проверки модели;
- описать ее логическую структуру и механизм работы;
- разработать ее функциональную модель и базу знаний;
- проверить работоспособность базы знаний в оболочке экспертной системы.

Ниже рассматривается механизм работы АСПК, основывающийся на производственной системе искусственного интеллекта, разработана логическая структура метаданных, используемая для представления проектируемой студентом и хранения правильных, с точки зрения преподавателя, моделей БД, приведена ее функциональная модель.

1. Логическая структура и механизм работы автоматизированной системы проверки курсовых работ

В соответствии с вышесказанным, задачами АСПК являются:

- проверки правильности имен, определений сущностей и атрибутов, имеющихся в гlossарии, заключающиеся в установлении их соответствия объектам описываемой предметной области, исключение тавтологии (рекурсии) в их определениях;
- синтаксический анализ IDEF1X диаграмм баз данных ER, KB, FA уровней;
- установление соответствия IDEF1X диаграмм FA уровня требованиям нормализации (семантический анализ);

При проверке курсового проекта непосредственно преподавателем анализ IDEF1X модели БД, описанной в проекте, основывается на знании преподавателем методологии IDEF1X и ее применении в анализе предметной области конкретной темы курсового проекта. В процессе проверки курсовой работы у преподавателя формируется собственное представление о моделируемых пользова-

тельских данных, отраженное в виде IDEF1X модели БД, которой должна соответствовать IDEF1X модель БД студента, в случае правильно выполненной курсовой работы. Установление соответствия между IDEF1X моделями БД студента и преподавателя также является критерием правильности курсовой работы при ее проверке с помощью АСПК [4].

Для каждой темы курсового проекта в АСПК существует как минимум один вариант правильной IDEF1X диаграммы, созданный преподавателем, представленный метаданными (МД), имеющими логическую структуру, удовлетворяющую синтаксису методологии IDEF1X [3].

Рабочими компонентами АСПК являются:

- метаданные модели студента (МДС) – набор таблиц базы данных соответствующей МД структуры, хранящих сведения о проектируемой студентом логической модели;
- метаданные модели преподавателя (МДП) – набор таблиц базы данных аналогичной МД и МДС структуры, хранящих реализации правильных схем БД, удовлетворяющих требованиям нормализации;
- продукционная система искусственного интеллекта, осуществляющая проверку синтаксической правильности схемы БД, выполненной студентом;

Механизм работы АСПК заключается в последовательном выполнении следующих шагов:

1. Проверка на принадлежность определений сущностей и атрибутов данных в глоссарии определений сущностей и атрибутов, имеющимся в МДП. При установлении данного соответствия имена и определения сущностей и атрибутов заносятся в МДС, а сами сущности и атрибуты связываются на основе данных определений с соответствующими сущностями и атрибутами в МДП. После чего студент выполняет построение схемы БД в графическом редакторе схем АСУКП.

2. Проверка синтаксиса построенной в АСУКП схемы БД с помощью продукционной системы искусственного интеллекта, формализация базы знаний которой приведена в разделе 2 данной статьи. Если в проверяемой продукционной системой схемой БД отсутствуют синтаксические ошибки, то данная схема считается синтаксически правильной, и сведения о ней заносятся в МДС, в противном случае студенту выдается сообщение об ошибке, и схема не фиксируется в МДС до тех пор, пока студент не исправит ошибку. Если в существующую схему БД добавляется новая сущность, не определенная ранее в глоссарии, то АСПК возвращается на шаг 1, где производится анализ на соответствие данной сущности структуре БД в МДП, таким образом, устанавливается принадлежность нового объекта модели БД к описываемой предметной области.

3. Проверка схемы БД на соответствие требованиям нормализации. Данная проверка заключается в установлении семантического соответствия схе-

мы БД в МДС схеме БД в МДП, получаемого на основе результатов SQL запросов к таблицам в МДС и МДП, связанных между собой по определениям сущностей в глоссарии на шаге 1. Если соответствие между МДС и МДП установлено, то логическая схема БД считается нормализованной, т. е. семантически правильной.

Схема БД в МДП, заданная преподавателем заранее, должна удовлетворять требованиям третьей нормальной формы (3 НФ), касательно сущностей, которые:

- не должны допускать повторяющиеся кортежи, кортежи отношений должны быть не упорядоченными, атрибуты сущностей должны быть не упорядочены и различаться по наименованию, все значения атрибутов должны быть атомарными – требования 1НФ.
- должны удовлетворять требованиям 1НФ, и в них не должно быть неполных функциональных зависимостей неключевых атрибутов от составного первичного ключа – требования 2НФ.
- должны удовлетворять требованиям 2НФ, и между всеми ее неключевыми атрибутами не должно быть транзитивных зависимостей – требования 3НФ [10].

Только удовлетворяющая перечисленным выше требованиям нормализации схема БД считается семантически правильной, так же следует отметить, что существуют требования нормализации схем БД и более высокого уровня, чем 3НФ, но в рамках данной статьи они рассматриваться не будут, поскольку на практике, как правило, достаточным оказывается соответствие проектируемой схемы БД требованиям 3НФ [11].

Формулировка задачи семантического анализа в теоретико-множественном представлении выглядит следующим образом:

Если обозначить множество реализованных в МДС схем БД как ММДС, а множество семантически правильных, с точки зрения преподавателя, схем реализованных в МДП как ММДП, то формально задачу семантического анализа схемы БД студента можно представить в виде:

$$\exists M((M \in \text{ММДС}) \wedge (M \in \text{ММДП})) \rightarrow S,$$

где M – проверяемая схема БД, а S – логический вывод, обозначающий отсутствие семантических ошибок в проверяемой схеме БД.

2. Формализация базы знаний продукционной системы искусственного интеллекта, используемой в автоматизированной системе проверки курсовых работ для синтаксического анализа схем базы данных

В статье приведена формализация экспериментальной базы знаний продукционной системы искусственного интеллекта, знания в продукционной системе представляются правилами-продукциями или продукциями, являющимися импликациями вида «если–то», имеющими обозначение:

$$\alpha \rightarrow \beta, \quad (1)$$

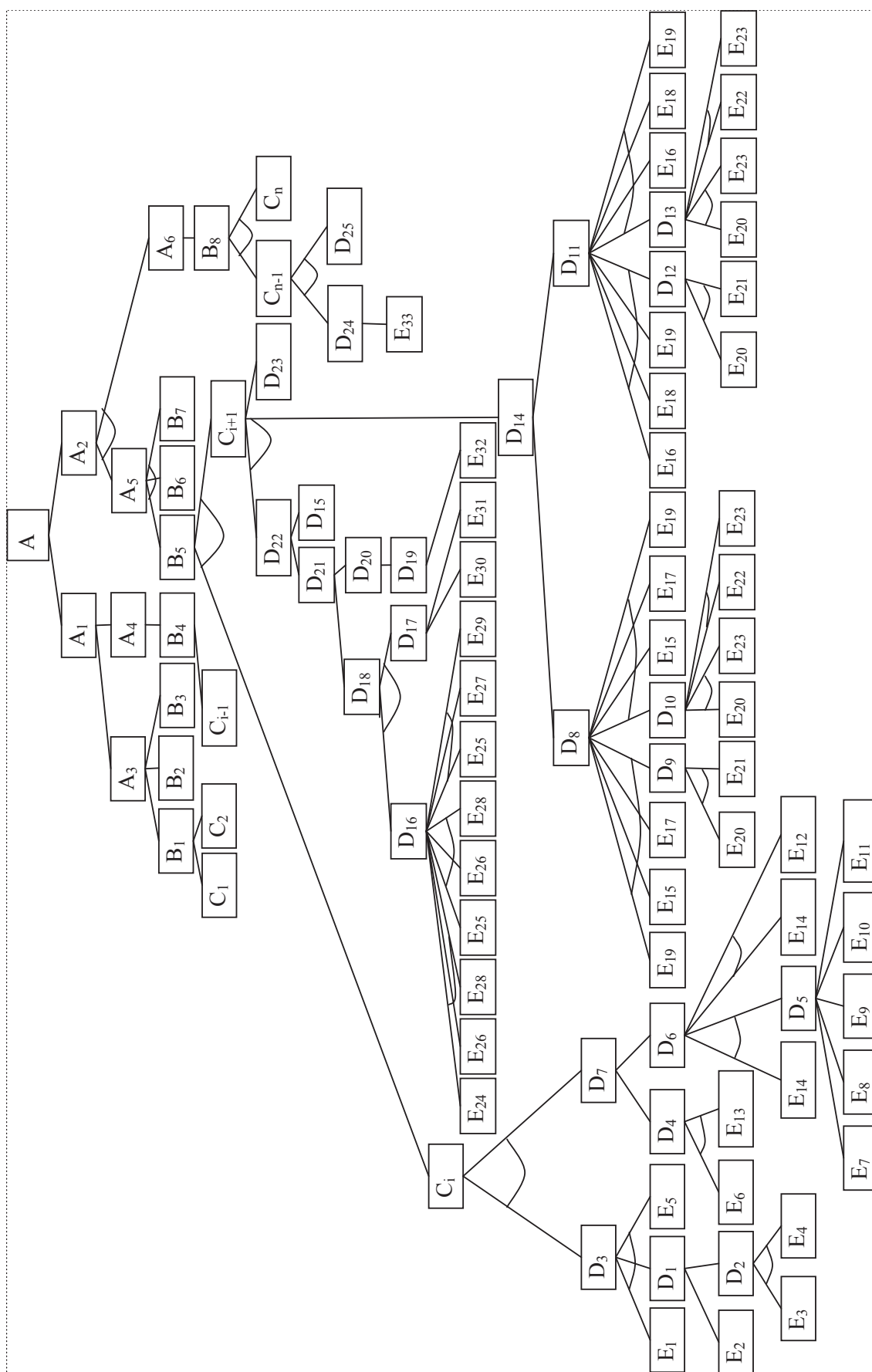


Рис. 1. Функциональная модель системы АСПК

где α – посылка; β – заключение. Для более подробного раскрытия условия применимости можно использовать выражение следующего вида:

$$P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_n \rightarrow B, \quad (2)$$

где P_i ($i=1,2,\dots,n$) – условия применимости, образующие конъюнктивную форму; B – заключение, которое может трактоваться как действие [12].

База знаний разделена на множества, элементы которых являются посылки и заключения, соответствующие синтаксическим правилам графотекстового языка IDEF1X описания логических моделей БД:

- E – входные данные продукционной системы.
- D – промежуточные данные, полученные из E .
- C – данные, не являющиеся прямыми следствиями из описания синтаксиса графической модели, но связанные с описанием ее семантики.
- B – выводы о наличии синтаксических и отсутствии или наличии семантических ошибок в анализируемой модели.
- A – принятые решения о принадлежности или не принадлежности анализируемой модели к множеству синтаксически и семантически правильных моделей БД.

На рис. 1 приведена функциональная модель системы АСПК.

Таблица 1. Правила-продукции продукционной системы

0) $E_7 \rightarrow D_5;$	29) $E_{25} \wedge E_{27} \wedge E_{29} \rightarrow D_{16};$
1) $E_8 \rightarrow D_5;$	30) $E_{30} \rightarrow D_{17};$
2) $E_9 \rightarrow D_5;$	31) $E_{31} \rightarrow D_{17};$
3) $E_{10} \rightarrow D_5;$	32) $E_{32} \rightarrow D_{19};$
4) $E_{11} \rightarrow D_5;$	33) $D_{16} \wedge D_{17} \rightarrow D_{18};$
5) $E_3 \wedge E_4 \rightarrow D_2;$	34) $D_{19} \rightarrow D_{20};$
6) $E_{14} \wedge E_5 \rightarrow D_6;$	35) $D_{18} \rightarrow D_{21};$
7) $E_{14} \wedge E_{12} \rightarrow D_6;$	36) $D_{20} \rightarrow D_{21};$
8) $E_2 \rightarrow D_1;$	37) $D_{21} \rightarrow D_{22};$
9) $D_2 \rightarrow D_1;$	38) $D_{15} \rightarrow D_{22};$
10) $E_5 \wedge E_{13} \rightarrow D_4;$	39) $D_{14} \wedge D_{22} \rightarrow C_{n+1};$
11) $E_{20} \wedge E_{21} \rightarrow D_9;$	40) $D_{23} \rightarrow C_{n+1};$
12) $E_{20} \wedge E_{23} \rightarrow D_{10};$	41) $C_1 \rightarrow B_1;$
13) $E_{22} \wedge E_{23} \rightarrow D_{10};$	42) $C_2 \rightarrow B_1;$
14) $E_{20} \wedge E_{21} \rightarrow D_{12};$	43) $C_{n+1} \rightarrow B_4;$
15) $E_{20} \wedge E_{23} \rightarrow D_{13};$	44) $C_1 \wedge C_{n+1} \rightarrow B_5;$
16) $E_{22} \wedge E_{23} \rightarrow D_{13};$	45) $C_{n-1} \wedge C_n \rightarrow B_8;$
17) $E_1 \wedge D_1 \wedge E_5 \rightarrow D_3;$	46) $B_1 \rightarrow A_3;$
18) $D_4 \rightarrow D_1;$	47) $B_2 \rightarrow A_3;$
19) $D_6 \rightarrow D_1;$	48) $B_3 \rightarrow A_3;$
20) $E_{19} \wedge E_{15} \wedge E_{17} \wedge D_9 \rightarrow D_8;$	49) $B_4 \rightarrow A_4;$
21) $D_{10} \wedge E_{15} \wedge E_{17} \wedge E_{19} \rightarrow D_8;$	50) $B_5 \wedge B_6 \wedge B_7 \rightarrow A_5;$
22) $E_{16} \wedge E_{18} \wedge E_{19} \wedge D_{12} \rightarrow D_{11};$	51) $B_8 \rightarrow A_6;$ 52) $A_3 \rightarrow A_i;$
23) $D_{13} \wedge E_{16} \wedge E_{18} \wedge E_{19} \rightarrow D_{11};$	53) $A_4 \rightarrow A_i;$
24) $D_3 \wedge D_7 \rightarrow C_i;$	54) $A_5 \wedge A_6 \rightarrow A_2;$
25) $D_8 \rightarrow D_{14};$	55) $A_1 \rightarrow A_i;$
26) $D_{11} \rightarrow D_{14};$	56) $A_2 \rightarrow A_i;$
27) $E_{24} \wedge E_{26} \wedge E_{28} \rightarrow D_{16};$	57) $D_{24} \wedge D_{25} \rightarrow C_{n-1};$
28) $E_{25} \wedge E_{26} \wedge E_{28} \rightarrow D_{16};$	58) $E_{33} \rightarrow D_{24}$

Формализация базы знаний системы АСПК в виде правил-продукций, полученных подстановкой характеристик анализируемой модели БД в формулы (1), (2), приведена в табл. 1.

Логический вывод в данной продукционной системе является прямым по образцу (вывод управляемый данными) со стратегией разрешения конфликтного множества правил-продукций в глубину.

3. Демонстрация работоспособности базы знаний

Продемонстрируем работоспособность базы знаний продукционной системы на основе прямого вывода по образцу от исходной последовательности предпосылок E к целевому состоянию системы A . В процессе вывода будет использоваться стратегия разрешения конфликтного множества правил, соответствующая алгоритму поиска решения в глубину. Поиск решения прекращается при достижении продукционной системой одного из терминальных состояний:

1. «Решение найдено» – состояние продукционной системы, соответствующее достижению в ходе поиска по образцу заданной цели – доказывает истинность утверждения о принадлежности анализируемой модели БД к множеству синтаксически правильных моделей с точки зрения методологии IDEF1X;
2. «Решение не найдено» – терминальное состояние продукционной системы, при котором за заранее указанное количество шагов либо по завершении просмотра всей базы знаний системой не была достигнута заданная цель поиска – указывает на невозможность доказательства заданного утверждения, что говорит о возможной синтаксической ошибке в анализируемой модели БД.

В качестве входных данных продукционной системы используются параметры, соответствующие синтаксически правильному описанию зависимой именованной сущности, имеющей именованную входящую идентифицирующую связь, изображенную в соответствии с требованиями уровня «сущность–связь» представления модели данных.

Данный пример вывода по образцу был проанализирован на достоверность принятого решения с помощью программной оболочки экспертной системы «Expert system», позволяющей работать со знаниями, представленными в продукционной системе искусственного интеллекта [13].

Результаты нескольких контрольных прогонов базы знаний изображены на рис. 2–4.

Прогон 1. Исходная последовательность фактов: $E_1, E_2, E_5, E_8, E_{14}, E_{25}, E_{26}, E_{28}, E_{31}, E_{20}, E_{21}, E_{19}, E_{15}, E_{17}$ – независимая сущность, удовлетворяющая требованиям именованной сущностей, имеющая 1 или более обязательную не идентифицирующую связь, именованную в соответствии с требованиями именования связей.

Таблица 2. Прямой вывод, перебор в глубину

№ шага	Рабочая память	Конфликтное множество	Активируемое правило
0	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn	–	–
1	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn	8, 10, 13, 16, 28, 31, 45	45
2	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8	8, 10, 13, 16, 28, 31, 51	51
3	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6,	8, 10, 13, 16, 28, 31	31
4	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17	8, 10, 13, 16, 28	28
5	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16	8, 10, 13, 16, 33	33
6	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18	8, 10, 13, 16, 35	35
7	E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21	8, 10, 13, 16, 37	37
8	E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22	8, 10, 13, 16	16
9	E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13	8, 10, 13	13
10	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10,	8, 10, 21	21
11	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8	8, 10, 25	25
12	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14	8, 10, 39	39
13	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14, Ci+1	8, 10	10
14	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14, Ci+1, D4	8, 18,	18
15	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14, Ci+1, D4, D7	8	8
16	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14, Ci+1, D4, D7, D1	17	17
17	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14, Ci+1, D4, D7, D1, D3	24	24
18	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14, Ci+1, D4, D7, D1, D3, Ci	44	44
19	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14, Ci1, D4, D7, D1, D3, Ci, B5	50	50
20	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14, Ci1, D4, D7, D1, D3, Ci, B5, A5	54	54
21	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14, Ci1, D4, D7, D1, D3, Ci, B5, A5, A2	56	56
22	B7, B6, E23, E22, E15, E17, E19, E31, E25, E26, E28, E2, E1, E5, E6, E13, Cn, B8, A6, D17, D16, D18, D21, D22, D13, D10, D8, D14, Ci1, D4, D7, D1, D3, Ci, B5, A5, A2, A	–	Решение найдено

Цель поиска: B5 – доказать принадлежность модели БД, включающей описываемый графический объект, к множеству синтаксически правильных моделей, с точки зрения методологии IDEF1X.

Прогон 2. Исходная последовательность фактов: соответствует выборке данных прогона 1, но без включения факта E5 – имя сущности не занесено в глоссарий модели.

Цель поиска: B5 – доказать принадлежность модели БД, включающей описываемый графический объект, к множеству синтаксически правильных моделей, с точки зрения методологии IDEF1X.

Прогон 3. Исходная последовательность фактов: E19, E5, E17, E4, E23, E7, E10, E13, E11, E9, E8, E6, E12, E1 – случайная выборка фактов.

Цель поиска: B5 – доказать принадлежность модели БД, включающей описываемый графический объект, к множеству синтаксически правильных моделей с точки зрения методологии IDEF1X.

Следует отметить, что в ходе выполнения курсовой работы студент может построить собственный

вариант синтаксически и семантически правильной модели БД, не предусмотренный преподавателем, в таком случае преподаватель должен зафиксировать новый вариант правильной модели БД в МДП.

Заключение

Разработана логическая структура АСПК, структура базы данных, хранящей проектируемые студентом и правильные, с точки зрения преподавателя, модели БД. Предложена функциональная модель АСПК, и формализована ее база знаний в виде правил продукций, которые были протестированы в оболочке экспертной системы.

Предлагаемое в данной статье решение не имеет аналогов среди существующих на сегодняшний день CASE-систем проектирования БД, ориентированных на задачи построения синтаксически правильных схем баз данных, а не обучения студентов. Авторы полагают, что предложенное в данной статье решение задачи проверки схем баз данных перспективно и требует его дальнейшей реализации.

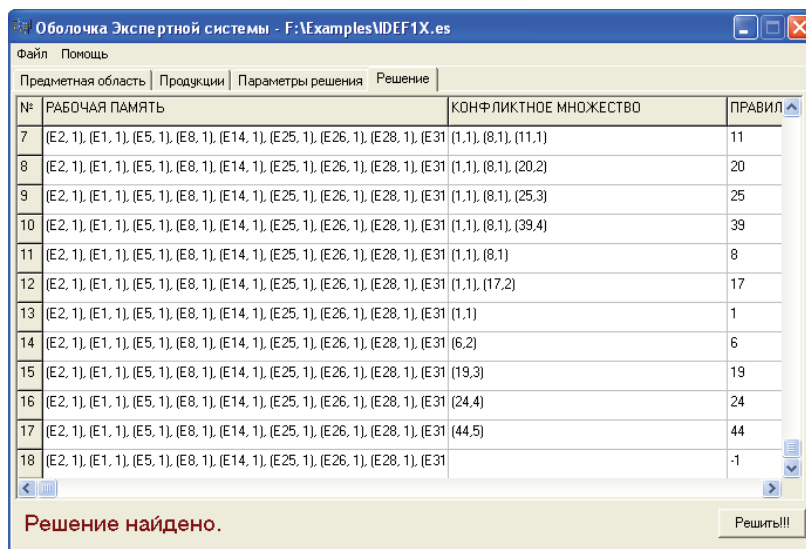


Рис. 2. Прогон выборки данных соответствующей правильно описанию объекта графической модели БД

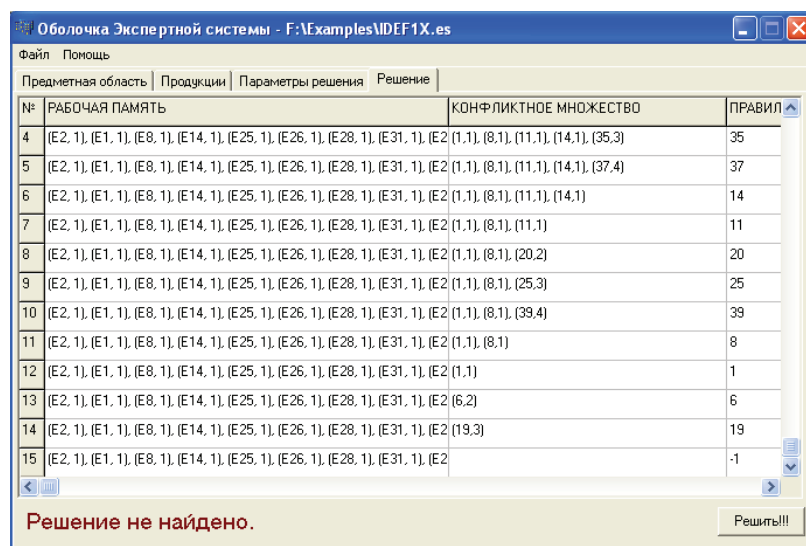


Рис. 3. Прогон выборки данных соответствующей описанию объекта графической модели БД, содержащей синтаксическую ошибку

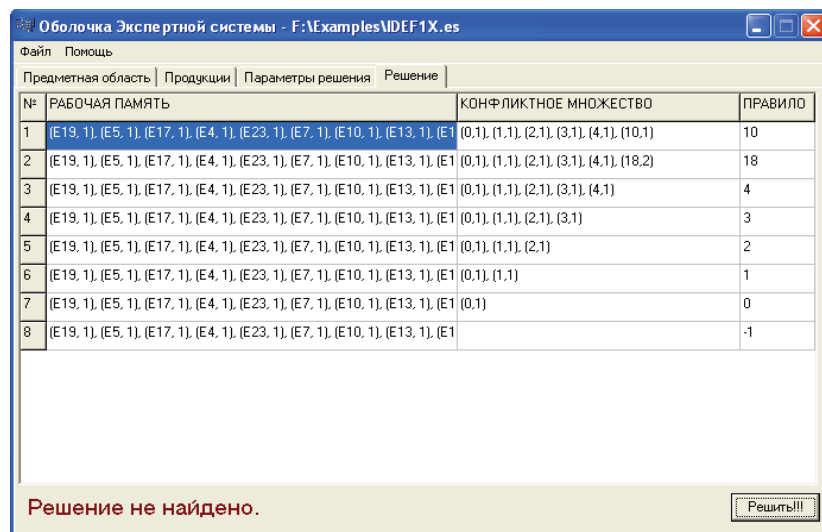


Рис. 4. Прогон выборки данных соответствующей случайному (неправильному) описанию объекта графической модели БД

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Integration Definition For Information Modeling (IDEF1X) // Federal Information Processing Standards Publication 184. – 1993. – 147 p.
2. Дейт К. Введение в системы баз данных. – Киев: Диалектика, 1998. – 781 с.
3. Сибилев В.Д., Тимаков А.О. Концепции автоматизированного управления курсовым проектом по дисциплине «Базы данных» // Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. Т. 2. Автоматизированные системы обработки информации, управления и проектирования: Сб. науч. трудов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2001. – С. 29–38.
4. Красиков И.А. Автоматизированная проверка курсовых работ по дисциплине базы данных // Проблемы и перспективы образования в России: Матер. X Междунар. научно-практ. конф. – Новосибирск, 2011. – С. 97–102.
5. Романенко А.В. Контроль знаний в электронных обучающих комплексах // Доклады Томского гос. университета систем управления и радиоэлектроники. Ч. 1. Технические науки: Сб. науч. трудов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2007. – С. 34–39.
6. Вендров А.М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем // ЦИТ форум. 2012. URL: <http://citforum.ru/database/case/> (дата обращения: 07.12.2012).
7. Красиков И.А. Коммуникативные и методологические проблемы обучения студентов проектированию баз данных // Тестирование в сфере образования: проблемы и перспективы развития: Матер. III Всероссийской научно-практ. конф. с междунар. участием. – Красноярск, 2010. – С. 186–190.
8. Маклаков С. Проверка качества модели данных с помощью ERwin Examiner // Журнал «КомпьютерПресс». 2012. URL: <http://compress.ru/Article.aspx?id=9437> (дата обращения: 07.12.2012).
9. Кузнецов С. Развитие логических моделей данных // ЦИТ форум. 2012. URL: http://citforum.ru/database/articles/ref_vs_nav_models/. (дата обращения: 07.12.2012).
10. Пушников А.Ю. Введение в системы управления базами данных. Ч. 2. Нормальные формы отношений и транзакции. – Уфа: Изд-во Башкирского ун-та, 1999. – 138 с.
11. Кузнецов С. Базы данных: достижения и перспективы на пороге XIX столетия // ЦИТ форум. 2012. URL: http://citforum.ru/database/classics/nfs_report/ (дата обращения: 07.12.2012).
12. Геловани В.А., Башлыков А.А., Бритков В.Б., Вязилов Е.Д. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 304 с.
13. Павлов С.Н. Системы искусственного интеллекта. В 2-х частях. Ч. 1. – Томск: Эль Контент, 2011. – 176 с.

Поступила 18.07.2012 г.

УДК 004.421

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПОТОКА НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

С.А. Хруль, Д.М. Сонькин

Томский политехнический университет
E-mail: siberianodis@gmail.com

Рассмотрена задача обработки потока навигационных данных для повышения достоверности и уменьшения объема исходных данных. С учетом анализа существующих подходов разработан адаптивный алгоритм отсева избыточных и ошибочных данных, работающий в режиме реального времени, основанный на диагностической фильтрации, позволяющий уменьшить поток навигационных данных, а также существенно снизить нагрузку на канал передачи данных. Приведен пример практического использования в рамках действующей системы мониторинга транспорта.

Ключевые слова:

Фильтрация навигационных данных, методы фильтрации данных, мобильные объекты, спутниковая навигационная система.

Key words:

Filtering navigation information, data filtering methods, mobile objects, navigation system.

Современным системам спутникового мониторинга подвижных объектов, использующим терминальное оборудование на мобильных объектах, необходима высокая достоверность принимаемых навигационных данных, достигнуть которой без использования различных алгоритмов обработки принимаемой информации не представляется возможным. Одним из решений, позволяющим повысить достоверность и уменьшить объем навигационной информации, передаваемой пользователю, является фильтрация ложных и избыточных данных, полученных от ГЛОНАСС/GPS модуля,

входящего в состав аппаратуры мобильного терминала [1].

GPS/ГЛОНАСС модуль принимает сигналы со спутников и после их обработки формирует сообщение, включающее ряд параметров о состоянии мобильного объекта, а также навигационную информацию. Производители GPS/ ГЛОНАСС-приемников используют различные алгоритмы окончательной обработки спутниковых сигналов, а также различные протоколы и форматы передачи навигационных сообщений терминалу. Наиболее распространенным форматом является NMEA-

протокол, который включает следующую информацию: T – время по Гринвичу; φ – широта в градусах; λ – долгота в градусах; h – эллипсоидная высота; $PDOP$, $VDOP$, $HDOP$ – факторы потери точности в пространстве, по высоте, по горизонтали соответственно; A – статус достоверности (1 – достоверны; 0 – не достоверны); M – режим позиционирования (0 – сигнал отсутствует; 1 – доступно только время; 2 – двухмерный режим позиционирования; 3 – трехмерный режим позиционирования).

Необходимость предварительной обработки и фильтрации данных, полученных непосредственно с навигационных приемников, обусловлена множеством причин, среди которых наиболее значимы:

- проблемы, связанные с питанием навигационного устройства (например, временное обесточивание терминала или сильные электростатические помехи на аппаратуру терминала);
- «холодный старт» приемника движущегося мобильного объекта;
- помехи отраженного сигнала на антенну ГЛОНАСС/GPS модуля;
- изменение условий приема сигналов со спутников (проезд в условиях плотной городской застройки, въезд в туннель или лесистую/горную местность, сложные метеорологические условия).

Использование фильтрации в системах мониторинга мобильных объектов позволяет значительно уменьшить объемы обрабатываемой информации с сохранением ее достоверности. Фильтрация заключается в исключении избыточных данных, не приносящих значимых изменений о положении объекта, а также отсева выбросов, которые приводят к искажениям данных и ошибкам в определении местоположения [6].

Под выбросами понимаются ошибочные данные не отражающие реальную ситуацию, которые были получены в результате технической ошибки аппаратуры, входящей в состав мобильного терминала или алгоритмической ошибки ГЛОНАСС/GPS модуля.

Можно выделить несколько типов выбросов:

- Хаотичный. Наблюдается при движении на малых скоростях или при стоянке на одном месте в течение непродолжительного времени. Появление таких ошибок объясняется помехами отраженных сигналов спутников от высотных зданий или других объектов. На карте данная ситуация отображается как дрейф (неравномерный разброс) предполагаемого местонахождения.
- Грубый (неконтролируемый сдвиг). Возникает в случае длительной стоянки автотранспортного средства на одном месте. Представляет собой движение в некотором направлении с постоянным ускорением в течение продолжительного интервала времени. Распознать такие выбросы на карте можно по характерному мгновенному (резкому) скачку из последней предполагаемой

точки местонахождения объекта на его реальное местоположение, при этом скачок сопровождается ускорением движения, выходящим за границы ограничений.

- Систематический. Обусловлен изменением условий приема сигналов со спутников. Систематические выбросы заключаются в некотором отклонении по одному или нескольким параметрам, в том числе координат местонахождения. В отличие от хаотичных выбросов, ошибка в определении координат сопровождается снижением встроенных показателей точности в получаемых навигационных данных.

Наличие любого типа выброса в полученных навигационных данных отрицательно влияет на точность и своевременность отображения объекта на карте, а также отрицательно сказывается на расчете контрольных показателей (пройденного пути, средней скорости движения и продолжительности стоянки, расхода топлива и т. д.) [7].

Например: мобильный терминал неподвижного объекта выдает координаты местонахождения, беспорядочно разбросанные в радиусе 20...30 м (рис. 1). При этом система рассматривает их как движение, и постепенно происходит увеличение пробега. В результате складывается ситуация, что пробег за несколько часов стоянки увеличивается на 200...800 м.



Рис. 1. Пример навигационных выбросов от неподвижного объекта

Фильтрацию навигационных данных можно разделять на аппаратную, выполняемую ГЛОНАСС/GPS модулем, и программную, выполняемую программным обеспечением терминала [1]. Аппаратная фильтрация заключается в анализе шумов и искажений сигналов со спутников и последующую их обработку с помощью цифровых математических фильтров, уникальных для каждой модели приемника. Программная фильтрация выполняется на терминале или диспетчерском центре и заключается в окончательном отсеке навигационных данных, полученных с навигационного модуля, с применением статистических алгоритмов сглаживания, учета показаний установленных на мобильном объекте датчиков, встроенных фак-

торов потери точности позиционирования и других аналитических методов. В случае транспортных средств такими датчиками могут быть: реле зажигания, датчик работы двигателя, датчик вращения колеса и другие. Благодаря их использованию мобильный терминал обрабатывает навигационную информацию от ГЛОНАСС/GPS модуля только после срабатывания датчиков, тем самым, исключая грубые выбросы.

Программная фильтрация является более универсальным способом отсева ошибочных данных и выбросов, поскольку в этом случае нет необходимости привязываться к конкретному производителю и виду навигационного приемника.

Программную фильтрацию целесообразно осуществлять на терминале мобильного объекта, поскольку в таком случае значительно снижается нагрузка на канал передачи данных между мобильным объектом и диспетчерским центром, а также уменьшается загруженность сервера хранения информации. Также в этом случае есть возможность передавать данные в режиме стека (приоритет за новыми данными). Такая реализация не требует значительных ресурсов для организации вычислений и выполнима на оборудовании терминала.

Существующие методы фильтрации данных, используемые в системах спутникового мониторинга, основаны на значениях встроенных факторов точности позиционирования ($HDOP$, $VDOP$, $PDOP$), а также срабатывания датчиков, установленных на мобильном объекте.

Для решения задачи фильтрации навигационных данных известны статистические методы фильтрации, включающие математические алгоритмы сглаживания (фильтр Калмана, метод наименьших квадратов, правило 3-х сигм, медианный фильтр), а также критерии для отброса выбросов данных (критерий Грабса, критерий Шовене, критерий Пирса, Q-тест Диксона) [2–4].

В случае, когда количество последовательных выбросов не велико, применение различных алгоритмов сглаживания позволяет добиться высокой точности навигационных данных о местоположении объекта. В ситуации, когда последовательные выбросы образуют целую «пачку» алгоритмы сглаживания не справляются (низкая точность), поэтому необходимо применение методов, способных отбрасывать ошибочную информацию (рис. 2) [3, 5].

Как видно из рисунка, рассмотренные алгоритмы сглаживания плохо реагирует на наличие выбросов и не справляются с выбросами в конце исследуемого промежутка.

Таким образом, использование различных алгоритмов сглаживания не позволяет полностью избежать ошибок в данных, поскольку такие алгоритмы позволяют достичь высокой точности только при анализе данных за некоторый период (сформированной выборки) и плохо справляются со сглаживанием вновь поступающих данных, особенно в тех случаях, когда последние являются ошибочными.

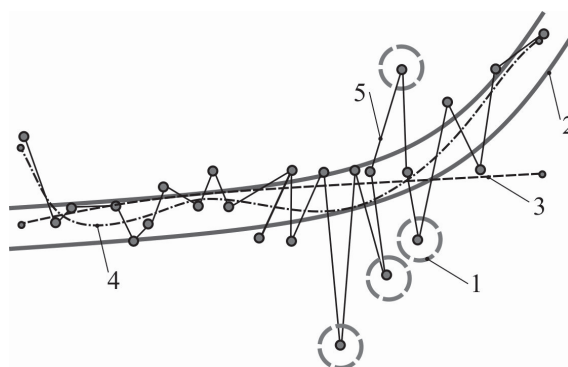


Рис. 2. Фильтрация данных с помощью алгоритмов сглаживания (1 – выбросы; 2 – эталонная дорога; 3 – линейное сглаживание; 4 – полиномиальное сглаживание со степенью 5; 5 – трек мобильного объекта)

Также для методов сглаживания необходимо хранение данных, полученных на предыдущих периодах. Чем больше хранимой информации, тем точнее окажутся сглаженные данные (точнее известна модель поведения). Стоит заметить, что объем хранимой выборки ограничен встроенной в терминальное оборудование памятью, поэтому сохранение большого количества навигационных данных не возможно. Также отметим, что сам процесс сглаживания достаточно трудоемкий и выполняется на мобильном терминале в течение относительно длительного времени, что приводит к ситуации, когда невозможно своевременно обрабатывать вновь поступающую информацию.

Проанализировав существующие подходы к решению задач фильтрации, было принято решение объединить их и дополнить диагностическими методами.

Предлагаемое решение можно разделить на 3 этапа:

1. Этап. Предварительный отсев:

На данном этапе осуществляется фильтрация данных, которые с большой долей вероятности являются ошибочными. Отсев осуществляется по следующим критериям:

- количество видимых спутников меньше допустимого значения;
- режим позиционирования не соответствует выбранному режиму;
- данные по показаниям статуса достоверности не валидны;
- значения встроенных факторов точности позиционирования больше допустимых значений;
- скорость движения превышает максимально допустимую для данного типа мобильных объектов (например: для транспортных средств – 300 км/ч, для морского судна – 100 км/ч);
- Также скоростной характеристикой может являться максимальное моментальное ускорение движения (например: для транспортных средств – $6 \text{ м}^2/\text{с}$, для морского судна – $3 \text{ м}^2/\text{с}$).

Таблица 1. Значения характеристик исследуемых мобильных объектов

Тип объекта	$S_{сутки}$	$V_{ср.}$	V_{max}	$T_{ср.стоян}$	$T_{движ.}$	$Q_{стоянок}$	$\bar{a}_{ср.}$	\bar{a}_{max}	$\bar{a}_{ср.торм.}$	$\bar{a}_{max торм.}$
СМП 1	118,8	29	75,2	13,6	6,46	25	0,207	1,305	0,2	1,1
СМП 2	146,7	27,7	95,6	15,2	7,06	8	0,233	1,31	0,18	0,7
ГПТ 1	204,7	25,6	70	3,06	12,2	9	0,16	1,19	0,17	1,21
ГПТ 2	241,4	23,6	65,1	1,34	13,09	7	0,118	0,91	0,116	1,17
СЛА 1	35,28	51,1	88,1	44	2,3	10	0,3	1,57	0,26	2,75
СЛА 2	27	41,5	95	150	2,01	5	0,331	1,95	0,29	2,48

2. Этап. Диагностическая фильтрация:

В качестве критерия фильтрации используется расстояние между двумя точками, которое должно быть не меньше порогового значения $Dlimit$.

Графически это представлено на рис. 3.

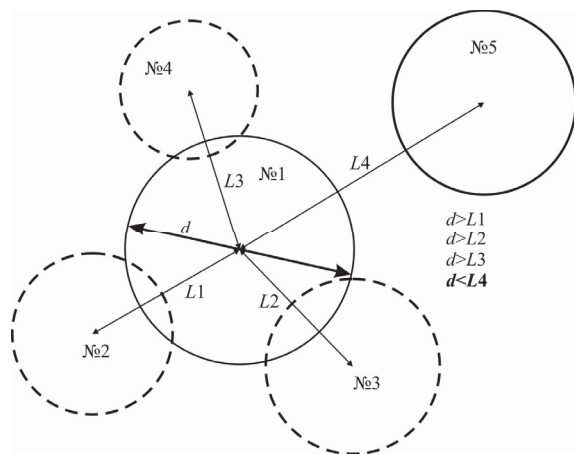


Рис. 3. Иллюстрация к алгоритму диагностической фильтрации

Радиус окружности (сферы в случае использования высоты) соответствует пороговому значению $Dlimit$ и вычисляется на основе точности позиционирования, которая зависит от значений факторов потери точности в текущий момент:

$$Dlimit = HDOP * HFactor + VDOP * VFactor,$$

где $HFactor$ и $VFactor$ соответствующие коэффициенты для DOP в метрах, далее просто коэффициенты.

Рекомендовать строго определенные коэффициенты нельзя, поскольку точность позиционирования зависит не только от качества сигналов со спутников, но и от типа приемника. В общем виде, диапазон рекомендуемых значений можно определить как 5...15 м для $HDOP$, 10...29 м для $VDOP$.

Данные о текущем местоположении проходят фильтрацию при условии, что их окружность не пересекается с окружностью предыдущей точки. Если фильтрацию подобного типа не выполнять, то помимо лишних, не несущих полезной информации данных, будут наблюдаться выбросы, пример которых был приведен ранее, на рис. 1.

Рассмотрим более подробно характеристики исследуемых мобильных объектов (табл. 1) на примере различных транспортных средств, где СМП 1, 2 – автомобили скорой медицинской помощи; ГПТ 1, 2 – автобусы городского пассажирского транспорта; СЛА 1, 2 – служебные легковые авто-

мобили; $S_{сутки}$ – пройденный путь за сутки, км; $V_{ср.}$ – средняя скорость движения, км/ч; V_{max} – максимальная скорость движения, км/ч; $T_{ср.стоян.}$ – средняя продолжительность стоянки, мин.; $T_{движ.}$ – продолжительность движения в сутки, час; $Q_{стоянок}$ – количество стоянок продолжительностью более 5 мин.; $\bar{a}_{ср.}$ – среднее значение ускорения, м/с²; \bar{a}_{max} – максимальное значение ускорения, м/с²; $\bar{a}_{ср.торм.}$ – среднее значение ускорения торможения, м/с²; $\bar{a}_{max торм.}$ – максимальное значение ускорения торможения, м/с².

Таким образом, исходя из табл. 1, можно сделать вывод, что при фильтрации данных для различного класса мобильных объектов требуется индивидуальный подбор значений параметров алгоритма (табл. 2).

Таблица 2. Результаты экспериментов за сутки для различных объектов и индивидуальные значения критериев

Тип объекта	Значения критерия			Период исследования, сутки	Частота сообщений, в минуту	Число точек до фильтрации	Число точек после фильтрации	Изменение количества точек, %
	$SpeedLimit$	$HFactor$	$VFactor$					
СМП 1	12	20	15	1	6	2422	744	69,3
СМП 2	12	20	15	14	6	62577	14758	76,4
ГПТ 1	8	15	12	5	6	28248	19203	32,1
ГПТ 2	8	15	12	7	6	42101	20134	52,3
СЛА 1	15	20	15	1	60	21037	790	96,3
СЛА 2	15	20	15	3	6	3761	1790	52,4

3. Этап. Сглаживание данных:

Необходимость сглаживания объясняется тем, что мобильный объект движется плавно, с постепенным изменением направления движения. Благодаря сглаживанию можно добиться реалистичного отображения пути передвижения, а также получить более точные значения пройденного расстояния (рис. 4).

Таким образом, разработан адаптивный алгоритм обработки навигационного потока данных, позволяющий уменьшить объем передаваемых данных и повысить их достоверность (рис. 5).

Основными достоинствами разработанного метода обработки данных являются:

- возможность работы в режиме реального времени (возможность применения алгоритма

в программном обеспечении мобильного терминала);

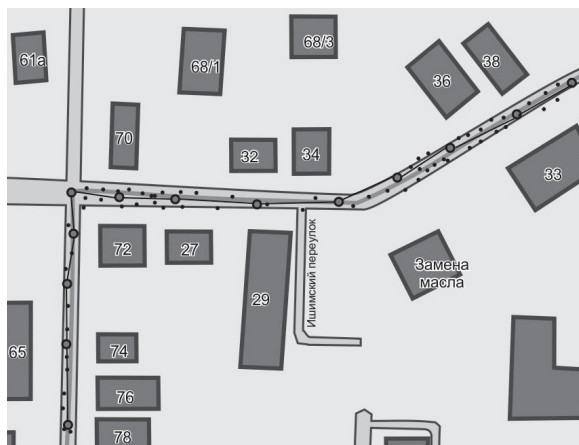


Рис. 4. Пример использования сглаживания

- простота исполнения (с точки зрения времени и трудозатрат оборудования на выполнение) алгоритма, а значит возможность использования маломощных и недорогих микроконтроллеров в составе аппаратуры мобильного терминала;
- значительное уменьшение потока данных для любого типа наблюдаемого объекта и его характера движения, вследствие чего снижение нагрузки на канал передачи между диспетчерским центром и мобильным объектом;

- улучшение точности производных параметров (путь, скорость, время движения и др.) вследствие отсева выбросов.

Пример работы адаптивного алгоритма обработки навигационных данных в системе мониторинга транспорта приведен на рис. 6.

Разработанный алгоритм реализован в виде самостоятельных программных модулей как для мобильного терминала, так и для серверного программного обеспечения системы мониторинга. Разработанные программные модули включены в состав существующей системы мониторинга мобильных объектов.

Выводы

1. Предложен адаптивный алгоритм обработки навигационных данных на основе метода диагностической фильтрации.
2. Отличительной особенностью алгоритма является динамическое вычисление порогового значения *Dlimit* (расстояние для определения смещения объекта) на основе данных о точности позиционирования (значений факторов потери точности в текущий момент времени) и типа объекта.
3. Разработанный адаптивный алгоритм обработки потока навигационных данных на основе метода диагностической фильтрации позволяет исключать недостоверные и избыточные данные для передачи в диспетчерский центр. В зависимости от типа объекта (характеристик его движения) поток данных уменьшается на

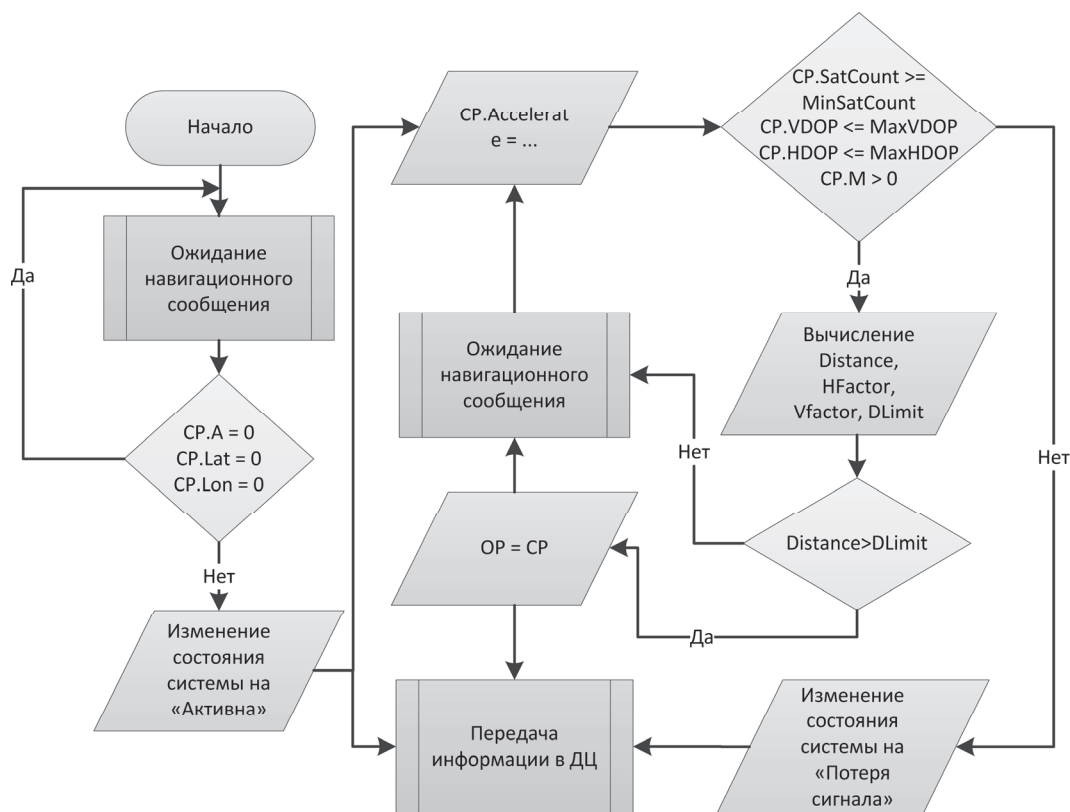


Рис. 5. Схема адаптивного алгоритма обработки потока навигационных данных

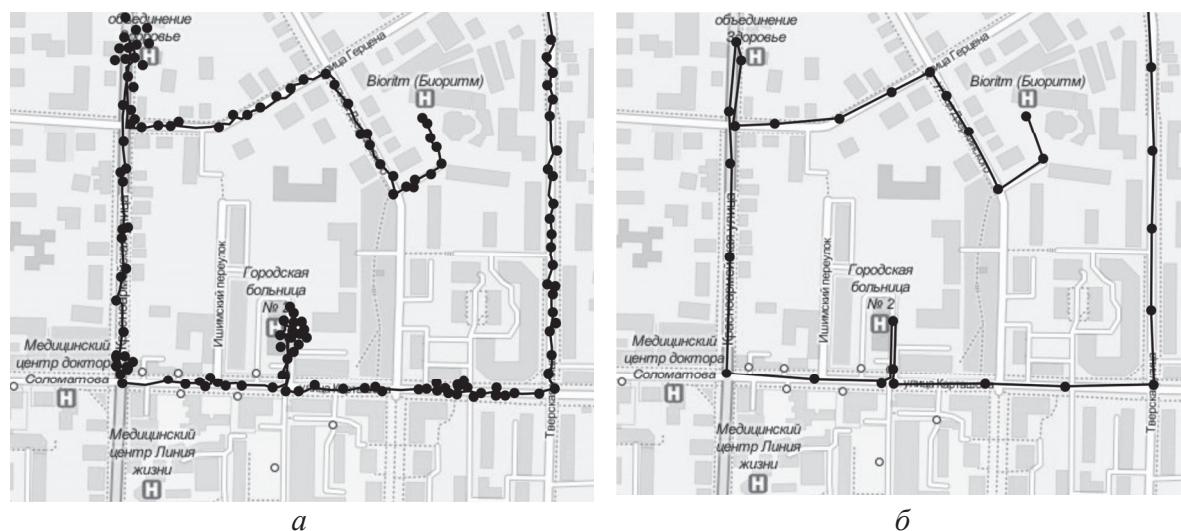


Рис. 6. Пример использования адаптивного алгоритма фильтрации навигационных данных в системе мониторинга транспорта: а) до применения алгоритма; б) после применения алгоритма фильтрации

30...50 % для городского пассажирского транспорта, служебных легковых автомобилей и на 50...70 % для выездных бригад скорой медицинской помощи.

4. В отличие от известных подходов предложенный алгоритм подходит для работы в режиме реального времени, обеспечивая заданную точность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владимиров В.М., Гречкосеев А.К., Толстиков А.С. Имитатор измерительной информации для отработки эфемеридно-временного обеспечения космической навигационной системы ГЛОНАСС // Измерительная техника. – 2004. – № 8. – С. 12–14.
2. Кошаев Д.А. Многоальтернативный метод обнаружения и оценки нарушений на основе расширенного фильтра Калмана // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 5. – С. 70–83.
3. Hang Guo, Min Yu, Chengwu Zou, Wenwen Huang. Kalman filtering for GPS/magnetometer integrated navigation system // Advances in Space Research. – 2010. – № 45. – P. 1350–1357.
4. Brilingaite A., Jensen C. Online Route Prediction for Automotive Applications // Proc. of the XIIIth World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services. – London, October 2006. – P. 168–175.
5. Шестаков Н.А. Позиционирование объектов в дорожной сети в системах мониторинга городского транспорта // Проблемы информатики. – 2011. – № 5. – С. 159–166.
6. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС // под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
7. Харисов В.Н., Яковлев А.И., Глушнко А.Г. Оптимальная фильтрация координат подвижного объекта // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 23. – № 7. – С. 1441–1452.

Поступила 09.10.2012 г.

УДК 004.75

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТОКОЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ПРИОРИТЕТАМИ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ В СИСТЕМЕ TOSSIM

Е. В. Тараканов

Томский политехнический университет

E-mail: tark@tpu.ru

Приведен обзор беспроводных сенсорных сетей, дано описание среды моделирования TOSSIM, и приведен пример моделирования протокола передачи пакетов данных в беспроводной сенсорной сети.

Ключевые слова:

Беспроводная сенсорная сеть, TOSSIM, моделирование беспроводной сенсорной сети, перегрузка сети, агрегирование предпочтений, отношение консенсуса.

Key words:

Wireless sensor network, TOSSIM, wireless sensor network modeling, network congestion, preference aggregation, consensus relation.

Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) (*wireless sensor networks*, WSN) все чаще используются для организации различных видов мониторинга: параметров окружающей среды [1], состояния конструкций, зданий и сооружений [2], в системах безопасности (пожарной, сейсмической, экологической и др.) [3], для отслеживания целей в процессе ведения боевых действий [4] и т. п. В таких системах разнородные данные собираются мультисенсорами, входящими в состав узлов, расположенных в подлежащих мониторингу точках определенной географической области, и передаются по беспроводной сети в центральный узел для обработки и принятия решений. Обычно сеть имеет иерархическую (древовидную) структуру, в которой на каждом уровне данные могут передаваться от узлов-источников к одному или нескольким узлам-приемникам.

При передаче данных в беспроводных сенсорных сетях возникают существенные проблемы, связанные с ограниченной полосой пропускания используемых в качестве линий связи радиоканалов. В частности, в ситуациях, когда много узлов-источников одновременно инициируют передачу данных, может возникнуть перегрузка или даже коллапс сети, в результате чего ее пропускная способность, выражаемая в количестве проходящих от источника к центральному узлу пакетов данных в единицу времени, падает практически до нуля.

Одним из возможных подходов к решению проблемы является назначение приоритетов передаваемым по сети пакетам и организация первоочередной доставки пакетов с более высоким приоритетом. Этот подход согласуется с концепцией качества обслуживания (*Quality of Service*, QoS), являющейся общепринятой для сенсорных сетей, основанных на обнаружении событий. Основными показателями QoS являются малая задержка передачи данных от источника к центральному узлу и низкие потери данных о событиях. Предложенный подход может быть использован для разработки протокола передачи пакетов данных в беспроводных сенсорных сетях.

Целью данной статьи является описание экспериментальной проверки протокола передачи пакетов данных в беспроводной сенсорной сети с учетом приоритетов передаваемых данных, назначаемых на основе отношения консенсуса, в среде моделирования TOSSIM.

Описание узла беспроводной сенсорной сети

Узел беспроводной сенсорной сети содержит вычислительный модуль, датчики (сенсоры), модуль беспроводной связи и модуль электропитания.

Основными особенностями микропроцессоров вычислительного модуля узла БСС являются низкое энергопотребление в рабочем и энергосберегающем режимах, управление энергопотреблением отдельных частей модуля; низкая стоимость и малые габариты.

Датчики сенсорных узлов отличаются малыми размерами и очень малым энергопотреблением порядка 1 А·ч.

Модуль беспроводной связи служит для организации беспроводной связи между узлами сети. В качестве модуля беспроводной связи используют высокоинтегрированные приёмники, передатчики и приёмопередатчики, работающие в нелицензируемых диапазонах частот.

Модуль электропитания обеспечивает длительное (до нескольких лет) функционирование узлов сети.

В качестве операционной системы для узлов сенсорной сети используется компонентная операционная система с открытым исходным кодом TinyOS [5], написанная на языке nesC. Библиотека компонентов TinyOS включает сетевые протоколы, драйверы сенсоров и утилиты получения и сбора информации, которые могут быть усовершенствованы в клиентских приложениях. При разработке TinyOS основное внимание было уделено обеспечению возможности использования для программирования языка с довольно высоким уровнем абстракции. В результате была создана операционная система (ОС) с простой, но весьма развитой ком-

понентной архитектурой. Специфика этой архитектуры заключается в обеспечении развитых и надежных механизмов параллельного выполнения задач в условиях крайне ограниченных ресурсов, в первую очередь памяти и электропитания.

Эмулятор сенсорной сети TOSSIM

Для тестирования программных продуктов для БСС необходимо развертывание достаточно больших количеств узлов и создание соответствующих условий окружающей среды. Для сокращения расходов и ускорения тестирования используются эмуляторы работы БСС. В настоящее время основными являются два широко используемых эмулятора – NS-2 [6] и TOSSIM [7, 8].

NS-2 разработан в Калифорнийском университете (США) для моделирования работы сети на уровне передачи пакетов и основан на интерпретаторе объектно-ориентированного языка Otcl. Эмулятор состоит из планировщика событий, библиотек объектов сетевых компонентов и библиотек задания параметров сети. Для запуска модели необходимо написать программу моделирования на Otcl, которая задает параметры сети и задала источникам трафика параметры генерации пакетов через планировщик событий.

TOSSIM также является разработкой Калифорнийского университета, но, в отличие от NS, TOSSIM работает за счет подмены компонентов TinyOS и, следовательно, позволяет проводить моделирование только сетей на базе TinyOS. Его плюсом является тесная интеграция с операционной системой, что позволяет моделировать не только передачу пакетов по сети, но и работу аппаратной части узла БСС. Для описания моделирования используется широко распространенный язык Python.

Таким образом, для моделирования БСС на основе TinyOS наиболее эффективным является использование эмулятора TOSSIM. Это позволяет проверить функционирование программного продукта в максимально приближенных к реальным условиям.

Основными характеристиками эмулятора TOSSIM являются:

- масштабируемость – эмулятор может моделировать работу как отдельных мотов, так и огромных сетей, состоящих из нескольких тысяч узлов;
- полнота – эмулятор в состоянии моделировать различные схемы взаимодействия элементов БСС, причем не только алгоритмы и сетевые протоколы, но и изменяющуюся структуру сенсорной сети;
- точность – эмулятор может представлять поведение сети с необходимой точностью. Определение точного времени наступления событий важно как для анализа, так и для тестирования приложений для БСС;
- достоверность – эмулятор реализует адекватный переход от моделируемой к реальной среде

выполнения приложения, предоставляя разработчику возможность тестировать код, который предназначен для реального оборудования.

В состав эмулятора TOSSIM входят следующие элементы:

- средство встраивания самого тестируемого приложения TinyOS в структуру эмулятора;
- очередь событий;
- набор программных компонентов, которые заменяют соответствующие аппаратные компоненты реальных мотов;
- механизмы описания моделей радиоканалов и аналого-цифровых преобразователей (ADC);
- средства связи, предоставляющие возможность внешним программам взаимодействовать с эмулятором.

Начальная топология сети задается в виде ориентированного графа, где узлы располагаются в вершинах графа, а дуги графа отвечают за качество связи между узлами. Значения, расположенные в дугах графа, соответствуют вероятности ошибки при передаче данных. Топология сети задается в виде текстового файла.

Для генерации пакетов данных сначала необходимо определить функцию, формирующую сообщение и обертывающее сообщение в пакет. Созданный таким образом пакет генерирует событие.

Обработка результатов

Для получения информации о ходе моделирования при передаче пакета данных и пересчете приоритетов узлов сети в файл журналирования пишется строка с заданной информацией, например, данные об отправке пакетов данных узлами БСС и данные о получении пакетов данных центральным узлом. Тем самым можно проследить весь путь пакета и посчитать количество получаемых центральным узлом пакетов данных от каждого из источников данных.

Для оценки вероятности потери пакета в зависимости от приоритета узла-источника необходимо провести моделирование при статических показателях сенсоров и сохранить вычисленные приоритеты узлов-источников.

Полученный таким образом журнал может занимать большой объем (порядка 100 Мб), поэтому для первичной обработки используются средства Unix shell. Во второй файл выделяются данные о получении центральным узлом пакетов данных и данные о передаче пакетов с узлов-источников данных.

Полученный второй файл имеет меньший объем и обрабатывается программой, написанной на Python и предназначенной для подсчета полученных пакетов с каждого узла и процента потерь.

Тестируемое программное обеспечение

Описанный метод моделирования применен для тестирования протокола передачи данных с динамическим назначением приоритетов узлов-источников данных на основе отношения консенсуса

(рис. 1). Приоритеты узлов БСС вычисляются на основе передаваемой с узлов измерительной информации и используются для создания формирования очереди передачи пакетов данных с учетом приоритетов пакетов и автоматического назначения интервалов ожидания передачи пакетов данных узлам сети.

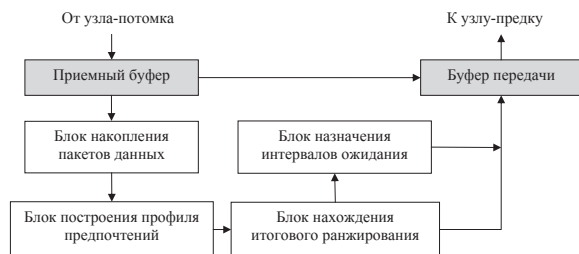


Рис. 1. Предложенная блок-схема протокола передачи данных узла

Каждый узел использует для передачи сообщений буфер в виде очереди. Если сеть перегружена или ее пропускная способность не позволяет отправить поступившее сообщение немедленно, то пакет отправляется в очередь сообщений. По достижении максимального размера очереди поступление нового пакета приводит к необходимости либо удалить уже существующий пакет из очереди, либо отбросить поступивший пакет. Назначение приоритетов узлам сети внутри кластера в соответствии с ранжированием консенсуса позволяет создавать очередь передачи пакетов с сортировкой по убыванию важности узла-источника пакета.

Приоритет узла-источника входящего пакета сравнивается с приоритетами узлов-источников уже находящихся в очереди пакетов, начиная с первого пакета. После обнаружения пакета, узел-источник которого имеет меньший приоритет, чем приоритет узла-источника входящего пакета, будет произведена вставка поступившего пакета перед пакетом с менее приоритетного узла. Если же окажется, что узел-источник входящего пакета имеет приоритет меньший, чем приоритет узлов-источников всех пакетов в очереди, то поступивший пакет будет отброшен.

Алгоритм распределения пропускной способности сети использует для работы уже сформированные приоритеты узлов-источников данных и задает интервалы передачи пакетов данных узлам-потомкам обратно пропорционально приоритету узла. Периодически обновленные интервалы передачи пакетов данных рассылаются узлам-потомкам через пакеты обратной связи.

Подробнее протокол описан в [9, 10].

Основными параметрами QoS для тестируемого программного обеспечения (ПО) являются задержка доставки пакетов данных до центрального узла и потери данных с более приоритетных узлов. Соответственно, в качестве результатов моделирования необходимо получить данные о задержке доставки пакетов данных до центрального узла в зависимости от узла и о проценте потерь пакетов в зависимости от приоритета узла БСС [11].

Экспериментальная проверка протокола передачи данных

В процессе эмулирования полагалось, что разработанный протокол передачи пакетов данных в беспроводной сенсорной сети, управляющий интервалами передачи пакетов данных и очередью передачи пакетов данных на основании приоритетов узлов, реализован на аппаратной платформе MICAz, состоящей из микроконтроллера Atmel AVR и микросхемы радиосвязи Chipcon CC2420 (рис. 2).



Рис. 2. Аппаратная платформа MICAz

В вычислительном эксперименте тестируемая беспроводная сенсорная сеть пожарной сигнализации состояла из 241 узла, организованных в 15 кластеров по 16 узлов в каждом. Каждый узел имеет в своем составе шесть сенсоров, измеряющих температуру, скорость изменения температуры, задымленность, уровень CO, срабатывание датчика пламени и присутствие персонала. Радиомодуль CC2420 обеспечивает скорость передачи данных до 256 кБ/с и имеет буфер в 10 пакетов по 60 байт. При построении исследуемой сети была использована топология кластерное дерево (рис. 3).

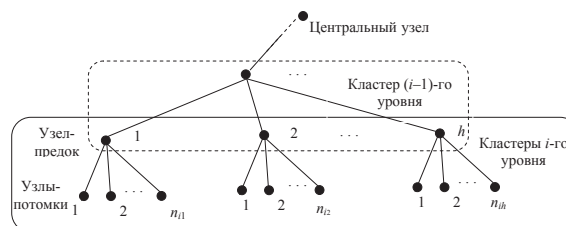


Рис. 3. Топология древовидной сети

Были организованы два эксперимента: в первом эксперименте проверялись управление интервалом ожидания передачи пакетов и задержка доставки пакетов до центрального узла сети; во втором эксперименте определялась доля потерянных пакетов в общем количестве отправленных к центральному узлу пакетов.

В первом эксперименте узлы располагались вдоль прямой линии. Предполагалось, что пожар начался в районе 26 узла и распространился вдоль

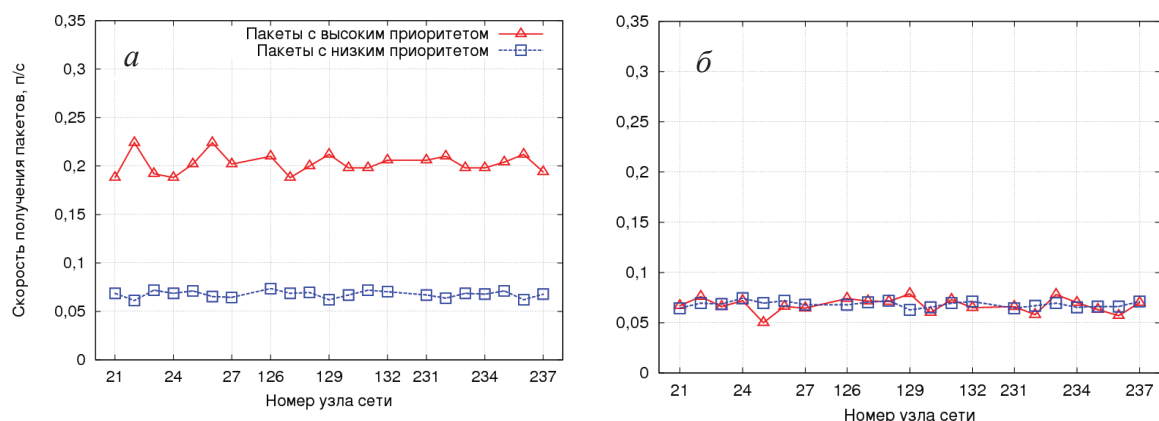


Рис. 4. Скорость получения пакетов центральным узлом а) при использовании; б) без использования разработанного протокола передачи данных

линии со скоростью 1 узел/с. За счет использования разработанного протокола передачи измерительных данных задержка при передаче пакетов данных на центральный узел с узлов, получающих информацию о пожаре (пакетов с высоким приоритетом), уменьшилась с 900 до 500 мс. При этом задержка при передаче данных для узлов, не получающих информации о пожаре (пакетов с низким приоритетом), выросла до 1800 мс.

Проведенное измерение количества пакетов, получаемых центральным узлом от узлов сети в секунду, показало, что при использовании разработанного программного комплекса передачи данных центральный узел получает в среднем 0,21 пакета данных с высоким приоритетом и 0,061 пакета данных с низким приоритетом в секунду. Без использования разработанного программного комплекса центральный узел получает 0,068 пакета данных в секунду (рис. 4).

За счет использования алгоритма управления интервалами ожидания передачи пакетов данных скорость отправки пакетов (количество отправленных к центральному узлу пакетов данных в секунду), например, с узла 129 при достижении пожаром района его расположения увеличивается с 0,26 до 0,86 пакетов/с (рис. 5).

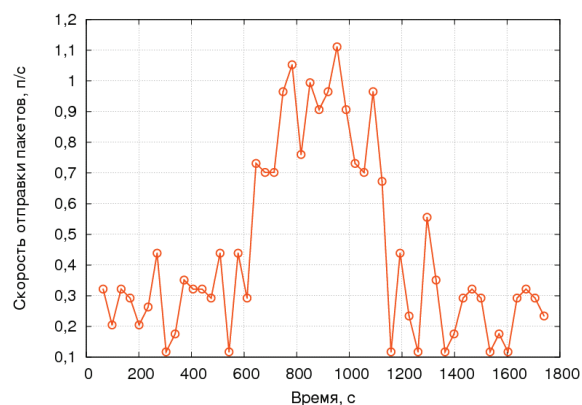


Рис. 5. Скорость отправки пакетов с узла 129

Во втором эксперименте для определения доли потерянных пакетов в общем количестве отправленных к центральному узлу пакетов, зависящей от приоритета узла сети, генерировались случайные значения показаний сенсоров. С каждого узла отправлялись 140 пакетов. Фиксировалось количество пакетов, полученных центральным узлом, по которому судили о доле потерь. Для узлов с приоритетами от 1 до 7 потери составили около 10 % всех пакетов, а для узлов с приоритетами от 8 до 16 потери составили около 90 % отправленных узлами пакетов (рис. 6).

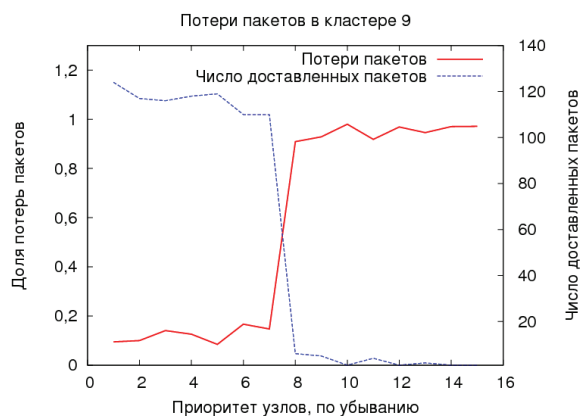


Рис. 6. Доля потерь пакетов в зависимости от приоритета узла сети

Выводы

Моделирование беспроводной сенсорной сети позволяет сократить расходы на тестирование и ускорить цикл разработки программного обеспечения. Для полномасштабного тестирования всех аспектов функционирования узла сенсорной сети оптимально использовать специализированную среду моделирования TOSSIM.

Проведенное тестирование протокола передачи пакетов данных в беспроводной сенсорной сети, управляющего интервалами передачи пакетов дан-

ных и очередью передачи пакетов данных на основании приоритетов узлов, показало уменьшение задержек при передаче и доли потерь высокопри-

оритетных пакетов данных, повышение скорости получения пакетов данных центральным узлом с узлов сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hart J., Martinez K. Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? // *Earth-Science Reviews*. – 2006. – № 78. – P. 177–191.
2. Ададуров С.Е., Шабельников В.А. Интеллектуальная система мониторинга искусственных сооружений // *Мир транспорта*. – 2009. – № 3. – С. 32–37.
3. Szweczyk R., Mainwaring A., Polastre J., Anderson J., Culler D. An analysis of a large scale habitat monitoring application // *Proceedings of the 2nd International conference on Embedded Networked Sensor Systems*. – Baltimore, MD, USA, 2004. – P. 214–226.
4. Parker J.R. Multiple sensors, voting methods and target value analysis // *Proceedings of VI SPIE Conference on Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition*. – Orlando, Florida, USA, 1999. – P. 305–335.
5. Levis P., Madden S., Gay D., Polastre J., Szweczyk R., Woo A., Brewer E., Culler D. The emergence of networking abstractions and techniques in TinyOS // *Proceedings of NSDI*. – San Francisco, CA, USA, 2004 – P. 1–14.
6. The network simulator // *The Network Simulator*. 2011. URL: http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/Main_Page (дата обращения: 21.10.2012).
7. Levis P., Lee N. TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications // *Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. – Los Angeles, CA, USA, 2003. – P. 126–137.
8. Сергиевский М.В., Сыроежкин С.Н. Беспроводные сенсорные сети: эмуляция работы // *КомпьютерПресс*. – 2008. – № 11. – С. 140–142.
9. Shao Tao, Chan M.C., Muravyov S.V., Tarakanov E.V. Pritrans: A Prioritized Converge-cast Scheme using Consensus Ranking in Wireless Sensor Networks // *Proceedings of SAS-2010*. – Limerick, Ireland, 2010. – P. 251–256.
10. Муравьев С.В., Тараканов Е.В. Передача данных в беспроводных сенсорных сетях с приоритетами на основе агрегирования предпочтений // *Известия Томского Политехнического университета*. – 2012. – Т. 320 – № 5. – С. 111–116.
11. Chen D., Varshney P.K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey // *Proceedings of the International Conference on Wireless Sensor Networks*. – Las Vegas, Nevada, USA, 2004. – P. 227–233.

Поступила 22.10.2012 г.

УДК 66.012–52

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫМ НАГРЕВОМ КРЕМНИЕВЫХ СТЕРЖНЕЙ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

А.Г. Горюнов, В.А. Курочкин, И.П. Чучалин, В.А. Москалев

Томский политехнический университет
E-mail: tachyon@tpu.ru

Рассмотрена проблема образования внутреннего градиента температуры в кремниевых стержнях во время парофазного химического осаждения поликристаллического кремния в Siemens-реакторе. Показаны способ и устройство с автоматической системой управления, позволяющие значительно снизить градиент температуры. С помощью математической модели разработана наиболее эффективная структура силовой части источника переменного тока и проверена устойчивость САУ источника.

Ключевые слова:

Siemens-реактор, поликристаллический кремний, математическое моделирование, источник переменного тока, система автоматического управления.

Key words:

Siemens-reactor, polycrystalline silicon, computer simulation, AC power supply, control system.

Введение

В основе практически всех российских производств поликристаллического кремния (ПКК) высокой чистоты (как проектных так и введенных в опытно-промышленную эксплуатацию) лежит Siemens-технология, реализующая метод парофазного химического осаждения – «Chemical vapor deposition» (CVD) кремния в процессе водородного восстановления трихлорсилана (ТХС). Технологический процесс проводят в т. н. Siemens-реакторе, представляющем собой химический реактор прочного типа, в котором образующийся кремний осаждается на разогреваемых электрическим током кремниевых стержнях-основах.

В процессе теплообмена с окружающей средой в кремниевых стержнях образуется внутренний градиент температуры. С ростом диаметра стержней увеличивается величина градиента. Внутренний градиент приводит к росту: трещинообразования, вероятности плавления центральной части, энергозатрат, снижает: возможность поддержания оптимальной температуры и качества управления. В итоге – внутренний градиент температуры ограничивает производительность, эффективность и качество производимого поликристаллического кремния. В 2007 г. группой зарубежных ученых проведено математическое моделирование температурного поля в кремниевых стержнях при нагреве гармоническим током, в 2009 г. проведено математическое и физическое моделирование температурного поля в кремниевых стержнях при резистивном нагреве.

Исследования [1] показали, что токи синусоидальной и биполярной импульсной формы наиболее эффективны среди исследуемых и практически обладают равной эффективностью. Применение таких форм тока для резистивного нагрева кремниевых стержней позволяет снизить на более чем 40 % величину внутреннего градиента температуры, что позволяет увеличить время кампании в условиях развитой площади поверхности массив-

ных стержней, сохраняя при этом высокую интегральную скорость осаждения кремния, а также снижая вероятность срыва технологического процесса вследствие превышения температуры центра стержней точки плавления и разрушения их из-за внутренних температурных напряжений.

Данная работа посвящена разработке источника переменного высокочастотного тока, который позволяет получить указанный выше результат. В связи с тем, что у кремниевого стержня в процессе осаждения меняется как активное сопротивление, так и индуктивность, то особое внимание уделяется автоматической системе управления, в которой реализуются экстремальный регулятор частоты, использующий ΔU в качестве управляемой переменной, что позволяет построить контур, способный быстро выйти в экстремальный режим и регулятор тока, включающий внутренний контур амплитуды тока и внешний контур коррекции амплитуды тока.

Источник питания переменного тока

Проведенный аналитический обзор и патентные исследования источников питания для резистивного нагрева кремниевых стержней говорят о том, что рынок источников питания для Siemens-реакторов в основном представлен источниками постоянного тока и источниками переменного низкочастотного тока (Siemens, GT Advanced-Technologies, Centroterm и др.). Решение, использующее переменный высокочастотный ток для нагрева кремниевых стержней представлено только компанией AEG PowerSolutions [2].

В ходе математического моделирования формирования температурного поля в кремниевых стержнях при нагреве токами различной формы установлено, что применение униполярных импульсов или предложенной компанией AEG суперпозиции двух гармоник, позволяет достичь снижения внутреннего градиента до 30 % при частоте переменного тока в 200 кГц, а биполярные импульсы

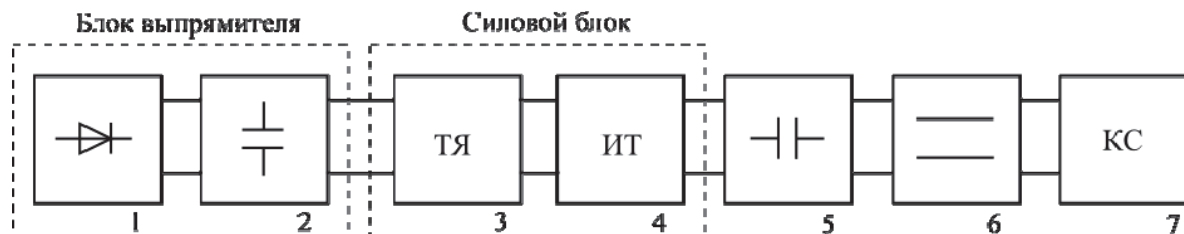


Рис. 1. Функциональная схема источника переменного тока: 1 – силовой трехфазный диодный мост; 2 – конденсаторная сборка; 3 – транзисторные ячейки; 4 – силовой импульсный высокочастотный трансформатор; 5 – малоиндуктивные высокочастотные конденсаторы; 6 – шина; 7 – кремниевый стержень

или гармонический ток – до 40 %, при частоте в 50 кГц [1].

Функциональная схема устройства, реализующего биполярные импульсные формы тока с частотой не менее 50 Гц [3], представлена на рис. 1.

Для обеспечения требуемых напряжений и токов в канале кремниевых стержней применяется принцип многосонной модуляции, основанный на разделении всего потока энергии на несколько каналов и их последующем суммировании [4].

В схеме источника использован резонансный инвертор с применением современных IGBT-транзисторов класса «U» (Ultra-Fast Speed) с временем спада импульсов (fail time) не более 50 нс и временем «хвоста» (tail time) не более 70 нс, что позволит повысить частоту тока до 100 кГц.

Силовые трансформаторы в схеме понижают напряжение с 600 до 160 В.

При напряжениях на нагрузке более 300 В (стартовый режим работы Siemens-реактора) необходимо использовать дополнительную третью ячейку с отдельным повышающим трансформатором с 600 на 1000 В, вторичная обмотка которого включается последовательно с основными вторичными обмотками.

Ферритовые сердечники при естественном охлаждении позволяют работать с индукцией 0,3...0,4 Тл [5]. К сожалению, изготовление ферритовых сердечников больших размеров связано с технологическими трудностями. Использование обычных сплавов в нашем случае приведет к громоздким конструкциям. В результате аналитического поиска обнаружены инновационные кольцевые магнитопроводы серии ГМ414 из аморфных и нанокристаллических сплавов, разработанные и выпускаемые научно-производственным предприятием «ГАММАМЕТ» [6]. Сплав имеет высокие индукцию насыщения и магнитную проницаемость, низкие коэрцитивную силу и магнитные потери.

При частоте тока 50 кГц напряжение на индуктивной составляющей нагрузки достигает 400 В. Поэтому для обеспечения значений тока более 1000 А при питании рассмотренных источников от промышленной трехфазной сети напряжением 380 В необходимо компенсировать реактивную мощность нагрузки с помощью конденсатора [7], в схеме это малоиндуктивные высокочастотные конденсаторы 5 (рис. 1).

Система автоматического управления

Функциональная схема САУ источником переменного тока приведена на рис. 2. Данная САУ содержит два контура управления:

- током нагрузки (I_n), включающий регулятор тока РТ, управляющим воздействием является коэффициент заполнения импульсов (m);
- резонансом напряжений (ΔU), включающий экстремальный регулятор частоты РЧ, управляющим воздействием является частота импульсов частотного преобразователя.

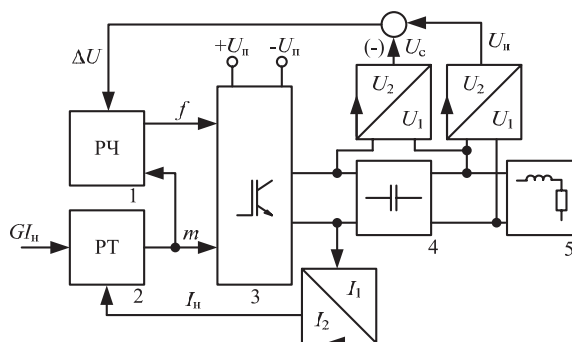


Рис. 2. Функциональная схема САУ источником переменного тока: 1 – регулятор частоты (РЧ); 2 – регулятор тока (РТ); 3 – частотный преобразователь (инвертор); 4 – резонансный конденсатор; 5 – нагрузка

Если коэффициент заполнения импульсов находится в диапазоне от 0 до 100 %, не включая границы, а нагрузкой является RLC-контур, то САУ током нагрузки может быть описана как линейная система, представленная на рис. 3.

С целью обеспечения высокого быстродействия и статической ошибки, регулятора тока, менее 1 %, применена каскадная система, включающая внутренний контур амплитуды тока и внешний контур коррекции амплитуды тока.

Регулятор среднего значения тока нагрузки работает при небольших отклонениях среднего значения тока нагрузки от заданного значения (до $\pm 10\%$). Это повышает устойчивость САУ при больших (более 10 %) возмущениях в канале тока. В случае, когда он отключен, заданное значение через поправочный коэффициент поступает на вход регулятора амплитуды тока нагрузки.

С целью обеспечения наибольшего быстродействия внутренний контур управления амплитудой тока нагрузки реализован на дискретных элемен-

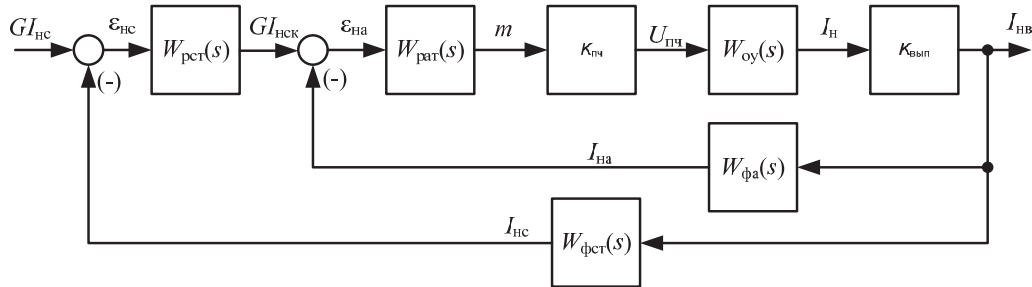


Рис. 3. Структурная схема САУ током нагрузки: $\epsilon_{нс}$ – отклонение среднего тока нагрузки $I_{нс}$ от заданного значения $GI_{нс}$; $\epsilon_{на}$ – отклонение амплитудного значения тока нагрузки $I_{на}$ от скорректированного заданного значения $GI_{нск}$; m – коэффициент заполнения импульсов ШИМ; $U_{пч}$ – напряжение на выходе преобразователя частоты ПЧ; $I_{н}$ – ток нагрузки; $I_{на}$ – выпрямленное значение тока нагрузки; ОУ – объект управления; $W_{рст}(s)$ – передаточная функция (ПФ) регулятора среднего значения тока; $W_{рст}(s)$ – ПФ регулятора амплитудного значения тока; $W_{фа}(s)$ – ПФ фильтра амплитуды тока нагрузки; $W_{фст}(s)$ – ПФ фильтра среднего значения тока нагрузки

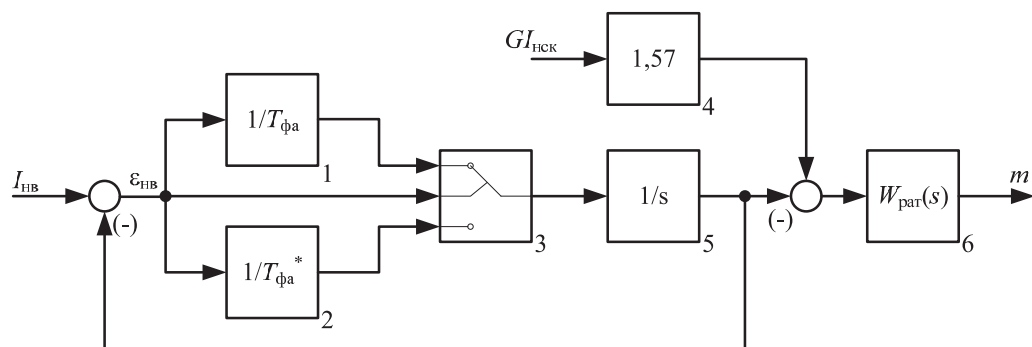


Рис. 4. Структурная схема САУ током нагрузки: 1, 2, 4 – блоки усилителей; 3 – реле; 5 – интегратор; 6 – регулятор амплитуды тока; $GI_{нск}$ – скорректированное заданное значение среднего тока нагрузки; $I_{на}$ – выпрямленное значение тока нагрузки; m – коэффициент заполнения импульсов ШИМ

тах. В этом случае регулятор и фильтр амплитуды тока могут быть представлены структурной схемой на рис. 4.

Реле – 3 коммутирует усилитель – 1 на интегратор – 5, если $\epsilon_{на} \geq 0$, либо усилитель – 2 на интегратор – 5 при $\epsilon_{на} < 0$. Постоянная времени $T_{фа}^*$ задается следующим образом:

$$T_{фа}^* = 10 \cdot T_{фа}.$$

Это позволяет достичь наибольшей скорости регулятора амплитуды тока в случае резкого увеличения тока нагрузки, высокой помехоустойчивости и работать фильтру как пиковому детектору.

Расчеты показали, что при частоте ШИМ, равной резонансной частоте RLC-контура, достигается экстремум (максимум) тока нагрузки (рис. 5). При этом при малых активных сопротивлениях нагрузки, когда действующее напряжение на индуктивности нагрузки $U_l \gg U_n$, выполняется условие:

$$\Delta U = U_c - U_n \approx 0.$$

Структурная схема САУ отклонением напряжения ΔU приведена на рис. 6.

Использование в качестве управляемой переменной отклонение ΔU дает возможность построить контур, способный быстро выйти САУ в экстремальный режим (рис. 5). При этом этот контур может представлять из себя линейную САУ по напряжению ΔU , так как имеются достаточные для

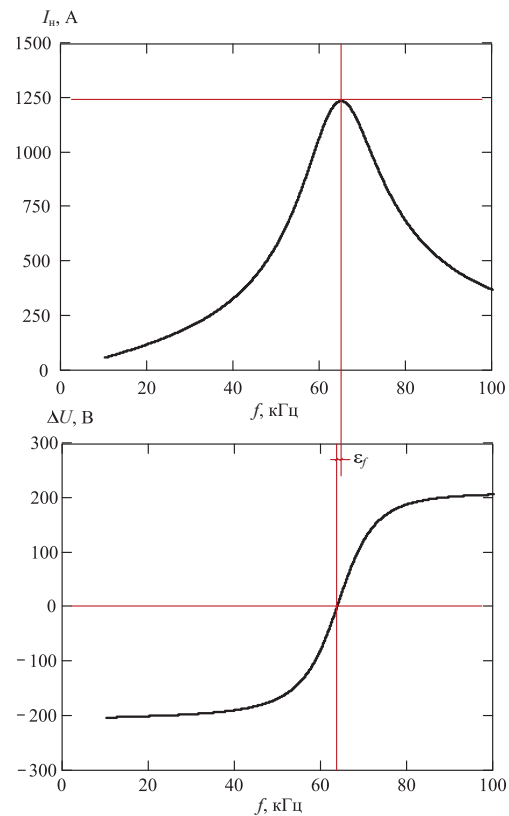


Рис. 5. Ток и напряжение на нагрузке

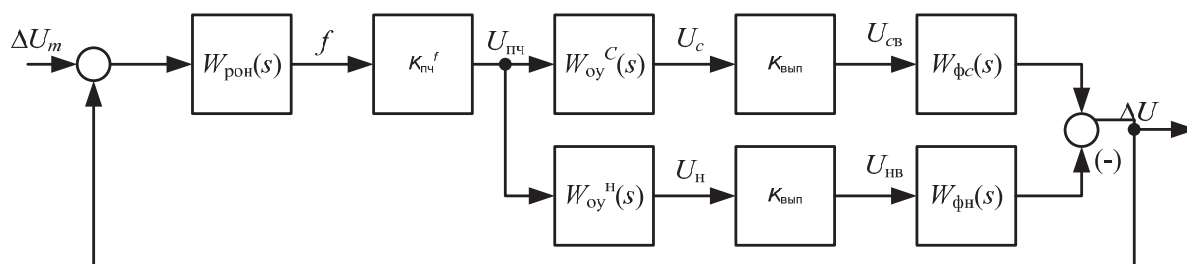


Рис. 6. Структурная схема САУ отклонением напряжения на резонансной емкости и нагрузке: $W_{рон}(s)$ – ПФ регулятора отклонения напряжения ΔU ; $W_{фс}(s)$ – ПФ фильтра среднего напряжения на резонансной емкости; $W_{фн}(s)$ – ПФ фильтра среднего напряжения на нагрузке; $U_{св}$ – выпрямленное напряжение на резонансной емкости; $U_{нв}$ – выпрямленное напряжение на нагрузке; ΔU_m – корректирующее напряжение для компенсации статической ошибки ε ; по определению резонансной частоты

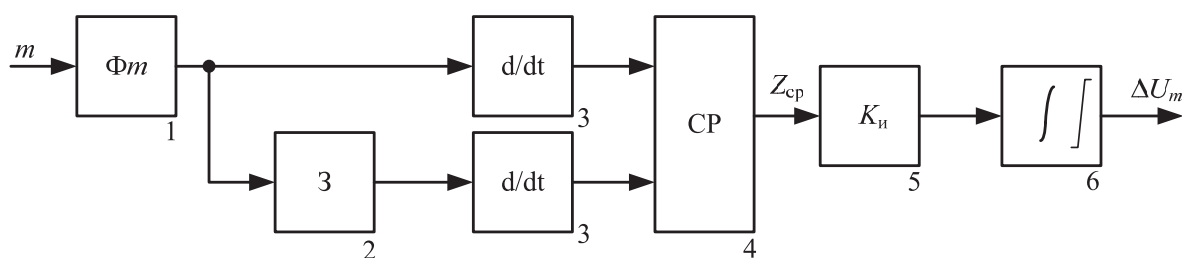


Рис. 7. Структурная схема экстремального регулятора коэффициента заполнения импульсов ШИМ: 1 – фильтр коэффициента m заполнения импульсов; 2 – звено запаздывания; 3 – дифференциатор; 4 – сигнум-реле (сигнум-регулятор); 5 – усилитель; 6 – интегратор с ограничением выхода

построения САУ линейные участки на статической характеристике $\Delta U(f)$.

С целью коррекции статической ошибки ε , (рис. 7) по определению резонансной частоты САУ отклонением напряжения ΔU снабдим дополнительным контуром, включающим экстремальный регулятор на основе сигнум-реле, представленный на рис. 7.

Целью управления является коррекция напряжения ΔU таким образом, чтобы достичь минимального m , что будет соответствовать экстремальному значению тока нагрузки.

Модель источника переменного тока

С целью упрощения расчетов при математическом моделировании различных структур источника переменного тока и его системы автоматического управления разработаны две математические модели, приведенные на рис. 8.

В упрощенной математической модели преобразователя частоты (рис. 8, а) используется источник ЭДС с широтно-импульсной модуляцией и управлением по коэффициенту заполнения импульсов и частоте их следования. Это позволяет существенно уменьшить время моделирования. Данная модель предназначена для исследования контуров САУ источником переменного тока.

В свою очередь, исследование возможных структур силовой части преобразователя частоты осуществляется на «полной» модели (рис. 8, б), учитывающей индуктивные и емкостные связи, а также динамические и статические характеристики IGBT транзисторов, диодов и др. элементов. При этом для уменьшения времени вычислений

контур управления частотой не моделируется, устанавливается частота, заведомо соответствующая резонансной.

Модель источника переменного тока также использовалась при синтезе и выборе системы управления Siemens-реактором [8].

Анализ переходных процессов (рис. 9) и показателей качества управления показывает, что у САУ источником переменного тока отсутствует перерегулирование, а время регулирования не более 1,5 мс при ошибке управления до $\pm 1\%$ и 30 мкс – при ошибке до $\pm 10\%$. Также результаты исследований показали малую чувствительность разработанной САУ к нестабильности параметров объекта управления.

Заключение

Ранее полученные результаты исследования формирования температурного профиля в кремниевых стержнях разогреваемых токами различной формы показали, что наибольший эффект снижения внутреннего градиента температуры в стержнях обеспечивается гармоническим и импульсным биполярным током, частотой не менее 50 кГц. Поэтому разработаны технические решения по аппаратной реализации источников переменного тока частотой от 50 до 100 кГц для резистивного нагрева кремниевых стержней реакторов получения поликристаллического кремния и их математические модели в виде программ для ЭВМ в среде MATLAB.

По результатам вычислительных экспериментов выбрана эффективная структура источника переменного тока на основе двух ячейкового резо-

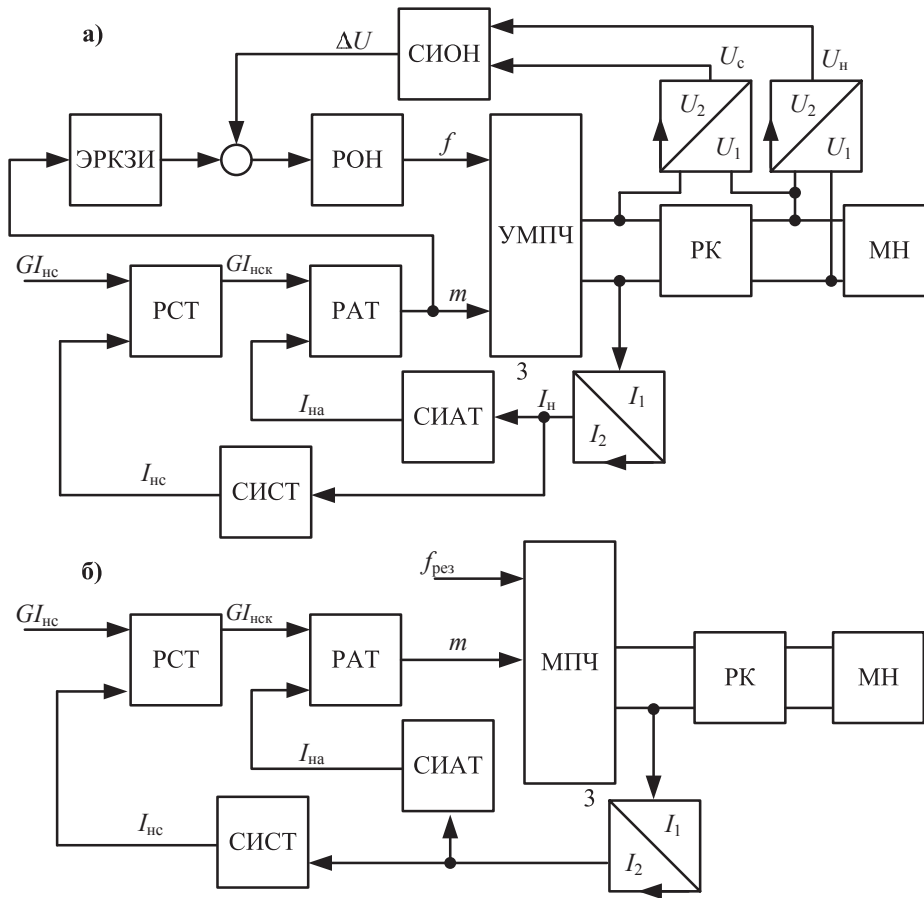


Рис. 8. Функциональная схема математической модели источника переменного тока: а) с упрощенной моделью преобразователя частоты (ПЧ); б) с «полной» моделью ПЧ. МН – модель нагрузки; РК – резонансный конденсатор; УМПЧ – упрощенная модель преобразователя частоты; МПЧ – «полная» модель преобразователя частоты; СИОН – схема измерения отклонения напряжения ΔU ; СИАТ – схема измерения амплитуды тока; СИСТ – схема измерения среднего значения тока; РОН – регулятор отклонения напряжения ΔU ; ЭРКЗИ – экстремальный регулятор коэффициента заполнения импульсов; ПАТ – регулятор амплитуды тока; РСТ – регулятор среднего значения тока нагрузки; $I_{на}$, $I_{нс}$ – мгновенное, амплитудное и среднее значения тока нагрузки; m , f – коэффициент заполнения и частота импульсов ШИМ; $f_{рез}$ – резонансная частота; U_c , U_n – напряжение на резонансном конденсаторе и нагрузке; G – заданное значение

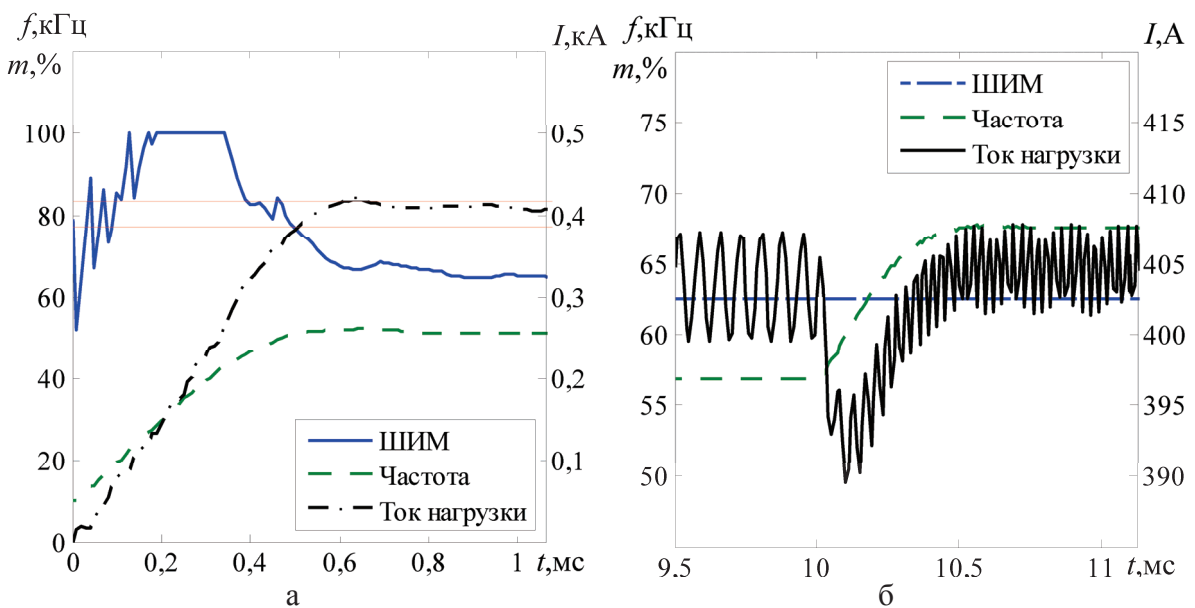


Рис. 9. Переходные процессы САУ источником переменного тока: а) по управлению (запуск); б) по возмущению (ступенчатое изменение индуктивности на 70 %). m , f – коэффициент заполнения и частота импульсов ШИМ; I – ток нагрузки

нансного преобразователя частоты с трансформаторной развязкой. Коэффициент полезного действия преобразователя составил не менее 97 %, что соответствует поставленной цели. Разработанная САУ, в условиях постоянно меняющихся параметров объекта, позволяет удерживать систему в резонансном режиме, что позволяет достигать максимальной активной мощности. При этом напряжение и ток на нагрузке имеют синусоидальную

форму без постоянной составляющей частотой до 100 кГц, что позволяет достичь наибольшего эффекта в снижении внутреннего градиента температуры кремниевых стержней (около 44 %) за счет скин-эффекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюнов А.Г., Козин К.А., Сачков С.А. Влияние параметров тока пульсирующей формы на резистивный нагрев стержней siemens-реактора // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – № 11/2. – С. 219–223.
2. Device and method for producing uniform temperature distribution in silicon rods during a precipitation process: Patent US 20090229991 A1, Pub. Date 17.09.2009. – 12 с.
3. Устройство равномерного нагрева поликристаллических кремниевых стержней. пат. № 121255 Рос. Федерация. № 2012119449; заявл. 11.05.2012; опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29. – 4 с.
4. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. – Новосибирск: Наука, 1979. – 304 с.
5. Черкашин Ю. Расчет трансформаторов при произвольных законах изменения напряжения и тока // Силовая электроника. – 2009. – № 2. – С. 26–30.
6. Производство магнитомягких сплавов и ленты с аморфной и нанокристаллической структурой под торговой маркой ГАММАМЕТ // Официальный сайт научно-производственного предприятия ГАММАМЕТ. 2012. URL: <http://www.gammamet.ru> (дата обращения: 20.07.2012).
7. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
8. Козин К.А., Горюнов А.Г., Сачков С.А. Синтез адаптивной системы управления нестационарным объектом – Siemens-реактором получения поликристаллического кремния // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 32–38.

Поступила 21.12.2012 г.

УДК 62–51

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ

С.С. Михалеви́ч, С.А. Байдали, И.П. Чучалин, В.А. Москалев

Томский политехнический университет
E-mail: mse@tpu.ru

Представлен математический аппарат, позволяющий моделировать методом пространства состояний линейные динамические системы, представляемые в виде произвольных комбинаций динамических звеньев, описанных в статье. Описан порядок моделирования системы автоматического управления методом пространства состояний. Представлен алгоритм выбора последовательности расчета блоков системы управления.

Ключевые слова:

Система автоматического управления, моделирование, пространство состояний, алгоритм.

Key words:

Control system, simulation, state space, algorithm.

Введение

На протяжении длительного времени в области автоматического управления уделяется большое внимание описанию динамических систем методами пространства состояний. Аналогичную тенденцию можно наблюдать и в других областях применения теории систем. Методы управления, основанные на частотном анализе, алгебре передаточных функций, преобразовании Лапласа и z -преобразовании, которые можно считать классическими, играют значительную роль в развитии и при-

менении теории управления и в родственных автоматизации областях. Вследствие их простоты и ясной связи с физической реальностью они, по-видимому, и в будущем сохраняют свое место среди современных методов описания динамических систем. Однако классические методы не могут сохранить свои позиции при решении задач многомерных и сложных систем, где они часто оказываются несостоятельными исключительно из-за вычислительных трудностей, тогда как методы пространства состояний позволяют осуществить четкую

формализацию и автоматизацию вычислительных процедур [1].

Из преимуществ метода пространства состояний следует отметить единую формулировку и возможность простого решения задач управления в многомерных системах, задач асинхронного и периодического квантования [2].

Описание систем в пространстве состояний позволяет обнаружить и исследовать такие свойства, которые при использовании классических методов частотного анализа и описания в терминах «вход–выход» остались бы скрытыми. Матричная форма записи, применяемая в методе пространства состояний, имеет неоспоримое преимущество при численном решении, а ясность математических формулировок и самих решений не ухудшается даже для многомерных систем, описывающих поведение сложных производственных комплексов [3].

В статье представлен математический аппарат метода пространства состояний, его связь с «классическим» представлением звеньев в виде дифференциальных уравнений, описывающих движение объекта, а также общий алгоритм последовательности расчета звеньев системы автоматического управления.

Метод пространства состояний позволяет представлять систему управления в виде системы уравнений [1]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t), \\ y(t) = C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot u(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $x(t)$ – вектор состояния; $y(t)$ – вектор выхода; $u(t)$ – вектор управления; $A(t)$ – матрица системы; $B(t)$ – матрица управления; $C(t)$ – матрица выхода; $D(t)$ – матрица прямой связи.

Рассмотрим линейную систему с постоянными параметрами, одним входом и одним выходом, представляемую в виде [4, 5]:

$$\begin{aligned} (p^n + \alpha_{n-1}p^{n-1} + \dots + \alpha_1p + \alpha_0)y = \\ = (\beta_n p^n + \beta_{n-1}p^{n-1} + \dots + \beta_1p + \beta_0)u, \end{aligned} \quad (2)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования.

Матрицы A, B, C, D уравнения (1) определяются из выражений:

$$\begin{aligned} A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots & -\alpha_{n-1} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} D \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{n-1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{n-2} & \alpha_{n-1} & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \alpha_0 & \alpha_1 & \dots & \alpha_{n-1} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \beta_n \\ \beta_{n-1} \\ \beta_{n-2} \\ \vdots \\ \beta_0 \end{bmatrix}, \\ C = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0], \\ D = b_0 = \beta_n. \end{aligned} \quad (3)$$

Приведенные уравнения состояния (3) соответствуют так называемому стандартному виду системы [1].

Зачастую составляющие систему управления объекты представлены в виде динамических звеньев, описываемых дифференциальными уравнениями или передаточными функциями, содержащими запаздывание.

На практике звено, содержащее запаздывание, можно разделить на два: звено запаздывания и звено, описываемое дифференциальным уравнением или передаточной функцией без запаздывания. Для расчета звена запаздывания можно использовать аппроксимацию Паде и решать данное звено как передаточную функцию без запаздывания.

Соединение звеньев системы

В зависимости от способа получения требуемых характеристик и технической реализации, звенья, из которых состоит система, могут быть соединены в различные комбинации. Самым употребляемым и широко известным методом представления системы управления является представление в виде структурной схемы, представляющей собой графическое отображение математической модели. В любой структурной схеме всегда можно выделить три типовых соединения звеньев: параллельное; последовательное; соединение с обратной связью. В отличие от соединения с обратной связью, параллельное и последовательное соединения звеньев подробно рассмотрены в литературе [6].

Параллельное соединение подсистем S_i ($i=1,2$) описывается уравнениями состояния:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i(t) \cdot x_i(t) + B_i(t) \cdot u_i(t), \\ y_i(t) = C_i(t) \cdot x_i(t) + D_i(t) \cdot u_i(t). \end{cases}$$

Матрицы $A_i(t), B_i(t), C_i(t)$ имеют размеры, соответственно, $n_i \times n_i, n_i \times m_i, l_i \times m_i$. Тогда при объединении систем S_1 и S_2 в общее уравнение (1) получим [6]:

$$\begin{aligned} A(t) = \begin{bmatrix} A_2(t) & 0_{n_2 \times n_1} \\ 0_{n_1 \times n_2} & A_1(t) \end{bmatrix}, \quad B(t) = \begin{bmatrix} B_2(t) & 0_{n_2 \times m_1} \\ 0_{n_1 \times m_2} & B_1(t) \end{bmatrix}, \\ C(t) = \begin{bmatrix} C_2(t) & 0_{l_2 \times n_1} \\ 0_{l_1 \times n_2} & C_1(t) \end{bmatrix}, \quad D(t) = D_1 + D_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Для реализации последовательного соединения подсистем рассмотрим систему S . Пусть входом системы S является вход подсистемы S_1 , $u(t) \equiv u_1(t)$; выход системы образуется выходом подсистемы S_2 , $y(t) \equiv y_2(t)$ и выход первой подсистемы S_1 поступает на вход подсистемы S_2 так, что их размерности совпадают, $l_1 = m_2$ и $u_2(t) \equiv y_1(t)$ (размерности матриц $A_i(t), B_i(t), C_i(t)$ равны, соответственно, $n_i \times n_i, n_i \times m_i, l_i \times m_i$).

Тогда при сведении уравнений (1) к общему уравнению состояния (1) получим [6]:

$$\begin{aligned} A(t) = \begin{bmatrix} A_1(t) & 0_{n_1 \times n_2} \\ B_2(t) \cdot C_1(t) & A_2(t) \end{bmatrix}, \quad B(t) = \begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \cdot D_1(t) \end{bmatrix}, \\ C(t) = [D_2(t) \cdot C_1(t) \quad C_2(t)], \quad D(t) = D_1(t) \cdot D_2(t). \end{aligned} \quad (5)$$

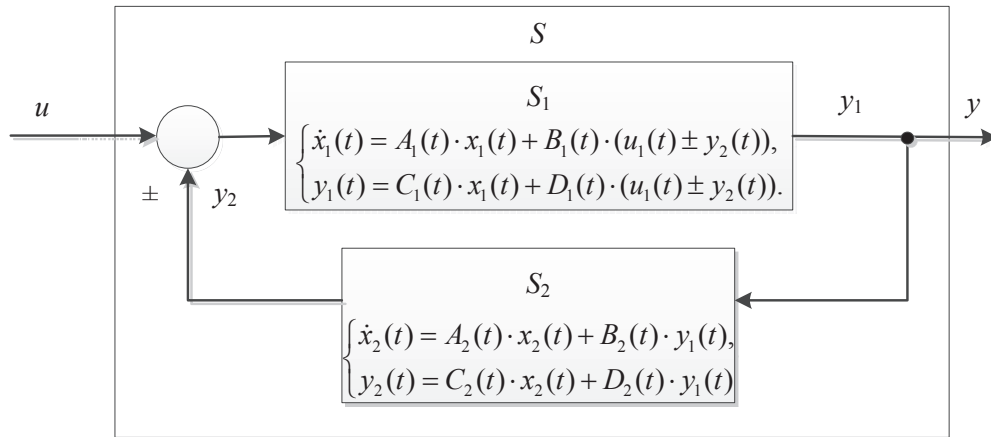


Рис. 1. Соединение с обратной связью

В литературе имеется описание для случаев соединения систем с обратной связью [6, 7], но оно не является полным, т. к. не учитывается прямая связь входа системы с его выходом. Иными словами, во втором уравнении системы (1) отсутствует второе слагаемое, что может привести к недостоверному результату. Для устранения данного недостатка система с обратной связью, структура которой показана на рис. 1, была представлена в виде системы уравнений (6):

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_1(t) \cdot x_1(t) + B_1(t) \cdot (u(t) \pm y_2(t)), \\ y_1(t) = C_1(t) \cdot x_1(t) + D_1(t) \cdot (u(t) \pm y_2(t)), \\ \dot{x}_2(t) = A_2(t) \cdot x_2(t) + B_2(t) \cdot y_1(t), \\ y_2(t) = C_2(t) \cdot x_2(t) + D_2(t) \cdot y_1(t). \end{cases} \quad (6)$$

Пусть подсистемы S_1 и S_2 соединены обратной связью (размерности матриц $A_i(t)$, $B_i(t)$, $C_i(t)$ подсистем S_1 и S_2 равны, соответственно, $n_i \times n_i$, $n_i \times m_i$, $l_i \times m_i$), т. е. выход подсистемы S_2 суммируется (или вычитается) с входом всей системы S и поступает на вход подсистемы S_1 . В качестве выхода системы S был использован выход подсистемы S_1 . При этом считалось, что $m_1=l_2$, $m_2=l_1$, $m=m_1$, $l=l_2$, $n=n_1+n_2$, $u_1(t)=u(t) \pm y_2(t)$, $u_2(t)=y_1(t)$.

Тогда после преобразований исходной системы к общему уравнению состояния (1) имеем:

$$A(t) = \begin{bmatrix} A_1(t) \pm \frac{B_1(t)D_2(t)C_1(t)}{1 \mp D_1(t)D_2(t)} & \dots \\ B_2(t)C_1(t) \pm \frac{B_2(t)D_1(t)D_2(t)C_1(t)}{1 \mp D_1(t)D_2(t)} & \dots \\ \dots \pm \frac{B_1(t)C_2(t)}{1 \mp D_1(t)D_2(t)} & \\ \dots A_2(t) \pm \frac{B_2(t)D_1(t)C_2(t)}{1 \mp D_1(t)D_2(t)} & \end{bmatrix},$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} B_1(t) \pm \frac{B_1(t)D_1(t)D_2(t)}{1 \mp D_1(t)D_2(t)} \\ B_2(t)D_1(t) \pm \frac{B_2(t)D_1(t)D_1(t)D_2(t)}{1 \mp D_1(t)D_2(t)} \end{bmatrix},$$

$$C(t) = \begin{bmatrix} C_1(t) \pm \frac{D_1(t)D_2(t)C_1(t)}{1 \mp D_1(t)D_2(t)} & \pm \frac{D_1(t)C_2(t)}{1 \mp D_1(t)D_2(t)} \end{bmatrix},$$

$$D(t) = D_1(t) \pm \frac{D_1(t)D_1(t)D_2(t)}{1 \mp D_1(t)D_2(t)}. \quad (7)$$

Моделирование ПИД регулятора

Неотъемлемой частью системы управления является регулятор. В системах управления уже долгое время находят применение линейные законы управления. Наиболее известен ПИД закон (пропорционально-интегрально-дифференциальный закон) регулирования.

Ввиду невозможности реализации идеального дифференцирования, в том числе с применением численных методов, ПИД регулятор моделировался в виде передаточной функции вида:

$$W_{\text{pez}}(s) = \frac{\left\{ (Kr \cdot Td \cdot N + Kr)s^2 + \left(Kr \cdot N + \frac{Kr}{Tu} \right) s + \frac{Kr \cdot N}{Tu} \right\}}{s^2 + Ns}, \quad (8)$$

где Kr , Ti , Td – параметры настройки пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора; N – порядок цифрового фильтра для обеспечения численного дифференцирования (обычно обратно пропорционален шагу расчета системы).

Далее, если представить функцию (8) в виде (1), то по формулам (3) можно получить матрицы A , B , C , D :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -N \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -Kr \cdot Td \cdot N^2 + \frac{Kr}{Tu} \\ Kr \cdot Td \cdot N^3 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \quad 0], \quad D = Kr \cdot Td \cdot N + Kr.$$

Следует отметить, что, зная методику представления ПИД регулятора, можно составить уравнения как для простых П и И законов регулирования, так и для ПИ, ПДД и других широко используемых линейных законов.

Алгоритм расчета системы

Рассмотрим САУ, представленную на рис. 2.

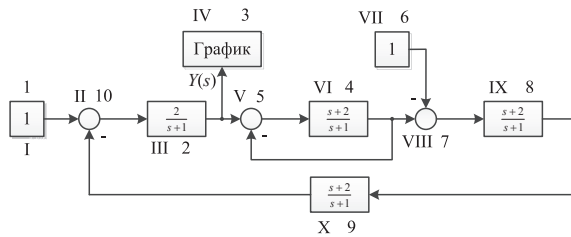


Рис. 2. Структура рассматриваемой системы: римскими цифрами показан порядок при последовательном расчете системы, арабскими – согласно предложенному алгоритму

Если производить расчет последовательно, т. е. от уставки [4] и до объекта управления, то результат будет некорректным, ввиду того, что мы изначально вводим смещение по времени, и как следствие, имеем неверный расчет.

Во избежание данной ошибки необходимо вести расчет так, чтобы не вводить смещение временной координаты. Для этого вводится понятие блока с «прямым выходом». Это означает, что выход звена напрямую зависит от его входов. К таким блокам относятся сумматоры, усилители и др. Предлагаемый алгоритм, показанный на рис. 3, предполагает на этапе инициализации последовательное нахождение звеньев с «прямым выходом». Затем проверяется, зависят ли входы первого найденного звена от выходов других аналогичных звеньев. Если зависимость найдена, то аналогично проверяется звено с «прямым выходом», от которого зависит первоначальное звено. Процесс останавливается, если либо удастся напрямую посчитать какой-либо блок, являющийся звеном с «прямым выходом», либо, как в приведенном выше примере, мы возвращаемся к выходу первоначального блока. Таким образом, если мы вернулись к первоначальному блоку, то прежде чем рассчитать

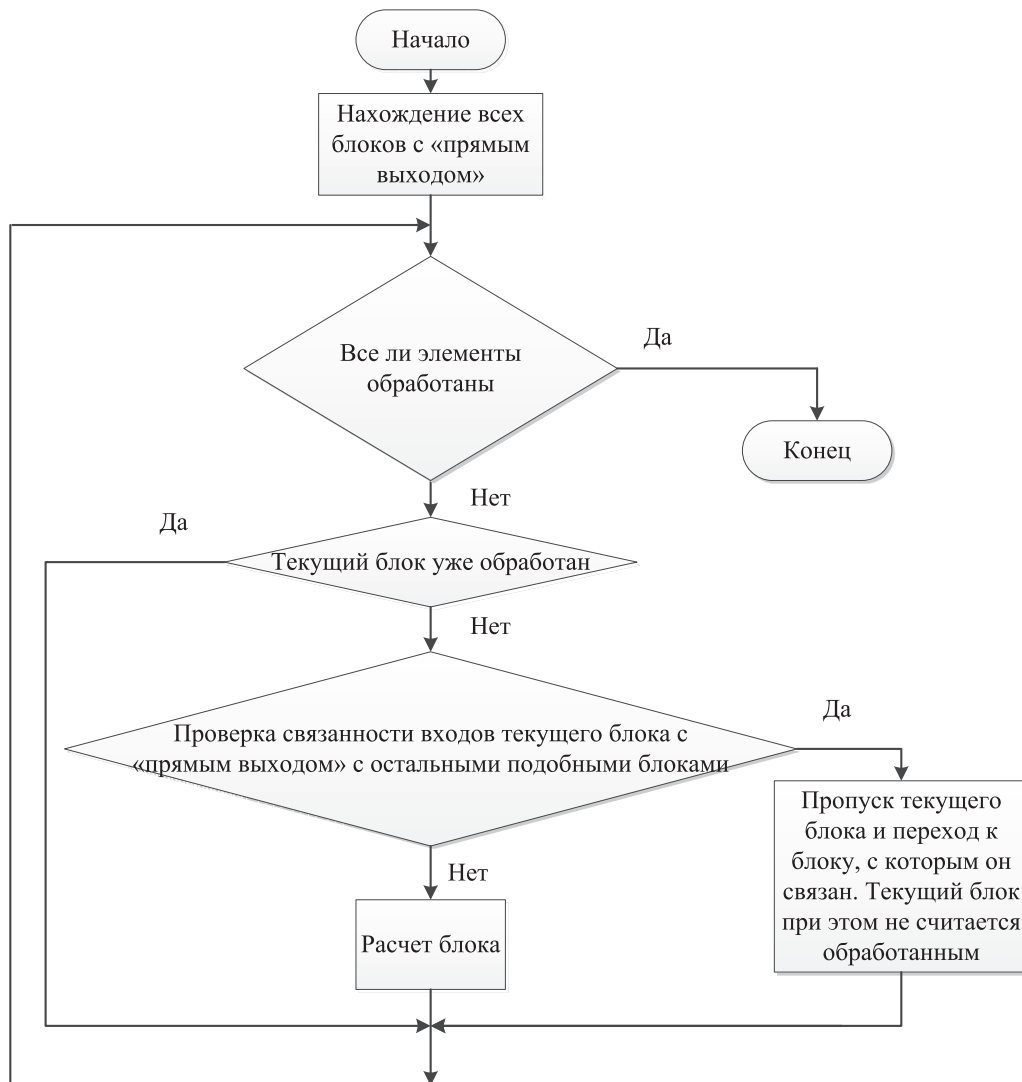


Рис. 3. Блок-схема алгоритма выбора порядка расчета звеньев системы

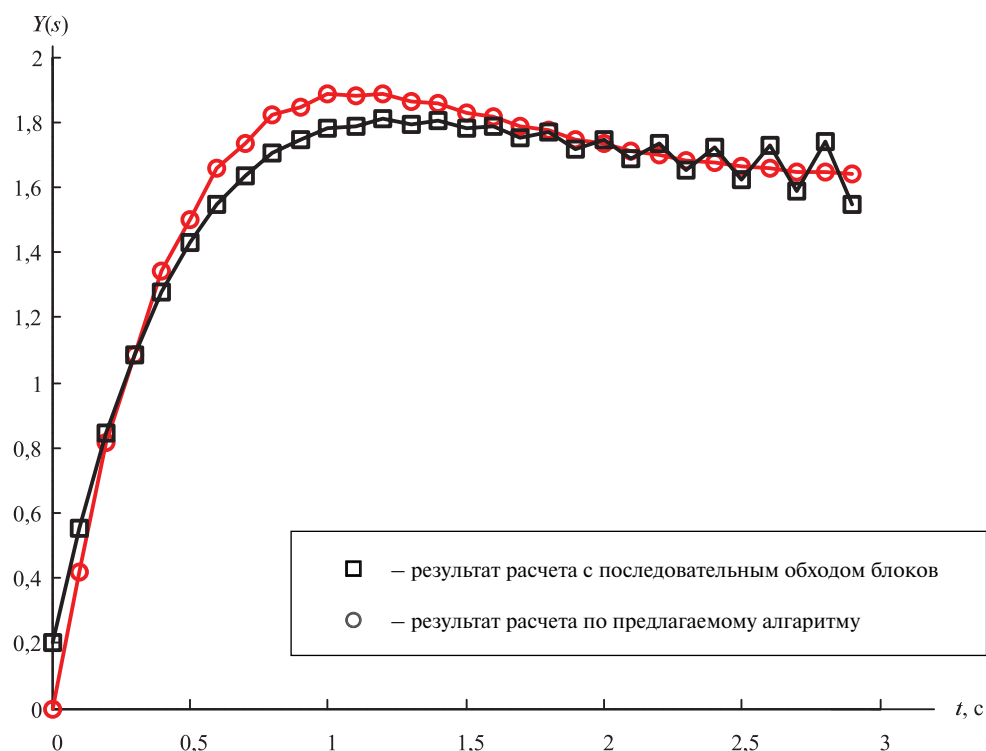


Рис. 4. Переходный процесс в динамической системе

его, мы находим значения выходов всех влияющих на него звеньев системы.

Для подтверждения корректности предлагаемого алгоритма порядка расчета системы, было проведено моделирование системы, изображенной на рис. 2. Результаты расчета, выводимые в блок «График», показаны на рис. 4.

Как следует из рис. 4, система, рассчитанная по предлагаемому алгоритму, не вносит смещение по времени и, тем самым, дает точный результат.

Заключение

В результате работы внесены коррективы в математический аппарат, позволяющий моделировать методом пространства состояний линейные динамические системы, представляемые в виде произвольных комбинаций динамических звеньев, описанных в статье. Составлен порядок описания и моделирования системы методом пространства состояний:

- каждое звено представить в виде дифференциального уравнения (2);
- получить системы уравнений пространства состояний для каждого звена, т. е. используя формулы (3), представить каждое звено в виде (1);
- произвести соединение подсистем: используя формулы (4), (5), (7), получить полное уравнение системы в пространстве состояний (в случае линейных систем управления, необязательно с нулевыми начальными условиями);
- в случае если количество оставшихся после преобразований блоков превышает один, необходимо воспользоваться алгоритмом, представленным на рис. 3, с целью выбора последовательности расчета звеньев системы.

Результаты работы планируется использовать в дальнейших исследованиях, посвященных автоматическому синтезу и анализу систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деруссо П.М., Рой Р.Дж., Клоуз Ч.М. Пространство состояний в теории управления: Для инженеров. — М.: Наука, 1970. — 620 с.
2. Шалаев Ю.Н. Моделирование краевой задачи нестационарных динамических систем // Известия Томского политехнического университета. — 2008. — Т. 312. — № 5. — С. 32–38.
3. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / Пер. с англ. под ред. Я.З. Цыпкина — М.: Наука, 1985. — 294 с.
4. Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Теория автоматического управления. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 196 с.
5. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с.
6. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. — СПб.: Наука, 2000. — 475 с.
7. Bakshi U.A., Bakshi M.V. Modern control theory. — Pune: Technical Publications Pune, 2008. — 386 p.

Поступила 22.12.2012 г.

Страницы истории ТПУ

УДК 378.662.007

КАФЕДРЕ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ – 40 ЛЕТ

В.А. Кочегуров, О.Г. Берестнева, Г.Е. Шевелев

Томский политехнический университет
E-mail: kva06@rambler.ru; ogb@rambler.ru

Статья посвящена 40-летию основания кафедры прикладной математики. Представлена история развития кафедры, ее специализации и научные школы.

Ключевые слова:

Кафедра прикладной математики, юбилей.

Key words:

Department of Applied Mathematics, anniversary.

Общеизвестна научная физическая школа, созданная профессором Воробьевым А.А. в Томском политехническом университете (ТПУ). Сооружение электронного синхротрона «Сириус», его запуск и ввод в эксплуатацию в ТПУ послужило толчком к развитию научного направления, связанного с математическим моделированием и применением средств вычислительной техники в физических исследованиях. В НИИ ядерной физики в 1965 г. была организована лаборатория вычислительной техники и автоматизации под руководством Кочегурова В.А., который в 1970 г. был избран заведующим кафедрой Инженерно-вычислительной математики.

В 1970 г. университет впервые набирает две студенческие группы по 25 человек на вновь утвержденную специальность – «Прикладная математика» с присвоением квалификации инженера-математика. Набор этих групп и подготовка были поручены кафедре Инженерной и вычислительной математики, обеспечивающей также в большом объеме обучение студентов ТПУ по общематематическим дисциплинам.

Для усиления профессиональной подготовки инженеров-математиков на Ученом Совете университета в 1972 г. было принято решение открыть специальную кафедру прикладной математики. В эту пору опыта подготовки инженеров-математиков в стране не было, поэтому учебные планы, программы разрабатывались самостоятельно с уче-

том приобретаемого опыта и рекомендаций учебно-методического Совета Минвуза по прикладной математике.

В 1984 г. была начата подготовка инженеров-математиков по целевой интенсивной технологии обучения. С этой целью были заключены договоры с предприятиями Министерства промышленных средств связи, Министерства геологии, Министерства электротехнической промышленности и Сибирского отделения АН СССР.

В 1986 г. в институте Оптики атмосферы СО АН СССР был открыт филиал кафедры прикладной математики, руководителем которого был назначен доктор физико-математических наук, заведующий отделом автоматизации института Оптики атмосферы Яковлев Н.Е. Кафедра устанавливает контакты с ведущими научными учреждениями, вычислительными центрами и промышленными предприятиями в городах Сибири, Дальнего Востока, Средней Азии и Урала.

В коллектив кафедры Прикладной математики, первоначально состоящей в основном из «чистых» математиков (ТГУ) и физиков (НИИЯФ, ФТФ), постепенно вливались ее выпускники, в итоге на кафедре образовался плодотворный союз физиков и прикладников-математиков. На этапе становления кафедры в тесном содружестве с НИИЯФ была продолжена исследовательская работа по моделированию пучковых систем, автоматизации научных исследований. Были созданы уникальные програм-

мные комплексы, обеспечивающие эффективное проведение вычислительных экспериментов на пучковых системах и моделирование нестационарных процессов в различных ускорительных установках (защитили кандидатские диссертации Дейнеженко А.Л., Дюгай П.А., Кабанова Л.И., Огородников А.С., Офицеров В.В., Романова В.Л., Рыжков Б.А., Станевко Г.И.; докторскую диссертацию – Коваль Т.В.). На мини ЭВМ был разработан вычислительный стенд «Луч», обеспечивающий многовариантное исследование формирования сильноточных пучков и процессов генерации СВЧ колебаний (защитили кандидатские диссертации Аспидов П.В., Жуковский О.И., Пильтяев С.А., Пыжьянов А.В.).

На кафедре получили развитие нетрадиционные оптико-цифровые методы обработки сейсмической информации. Под руководством доцента Иванченкова В.П. были созданы оригинальные системы, включающие оптический аналоговый процессор, микро ЭВМ. В этой области были созданы технологии ввода и обработки информации в оптико-цифровом вычислительном устройстве, математические методы обработки сейсмограмм и прослеживания отраженных волн (защитили кандидатские диссертации Кочегуров А.И., Кувшинов А.М., Минеев П.В., Орлов О.В., Посконный Г.И., Степанов Д.Ю.). Результаты работы нашли широкое применение при обработке полевых материалов по заданию Томского Геофизического треста.

В 1980 г. кафедра прикладной математики устанавливает контакты с медицинскими учреждениями и совместно с ними начинает заниматься вопросами моделирования и обработки информации в медицине. Совместно с кафедрой педиатрии Томского медицинского университета выполнена работа по прогнозированию здоровья детей на первом году жизни. Кроме этого, разработаны программные комплексы автоматизированной системы профилактического обслуживания населения, обработки ангиографической информации в сотрудничестве с кафедрой промышленной и медицинской электроники и институтом кардиологии РАМН (защитили кандидатские диссертации Берестнева О.Г., Гергет О.М., Константинова Л.И., Мончакиди Г.А., Шкатова Г.И.).

В это же время кафедра участвует в выполнении Государственной программы АСНИ информатизации России. По тематике программы защитили кандидатские диссертации Вадутова Ф.А., Грошев А.Р., Козловских А.В., Рыбалка С.А., Тиссен П.Н., докторскую диссертацию – Шумилов Б.М. Коллектив из выпускников кафедры и ФТФ под руководством канд. техн. наук Савинова А.П. развернул работы по исследованию термоэмиссионных источников энергии на основе ядерных реакторов на быстрых нейтронах (защитили кандидатские диссертации Бабушкин Ю.В., Великанов В.В., Зимин В.П., Мендельбаум М.А., Суханов М.С.).



Рис. 1. Студенты кафедры ПМ на занятиях по программированию (ЭВМ «Проминь»), 1970 г.

В 1991 г. кафедра прикладной математики одной из первых в стране начинает подготовку специалистов по прикладной математике по многоуровневой системе. Для этих целей были впервые разработаны новые учебные планы и рабочие программы для трех уровней подготовки: бакалавр (4 года), инженер (5 лет), магистр (6 лет). В 1999 г. на кафедре была открыта новая специальность «Математические методы в экономике». Всего подготовлено: 1024 инженеров, 305 бакалавров, 59 магистров. Выпускники кафедры пользуются спросом, работают в крупных промышленных предприятиях, научных учреждениях, зарубежных фирмах, руководят частными фирмами и объединениями.

В 2000 г. заведующим кафедрой избран Григорьев Владимир Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, академик Международной академии информатизации, автор 4 монографий, одна из которых опубликована в Англии (Кембридж), более 200 статей и 15 патентов.

С самого основания кафедры обучение студентов осуществляется неразрывно с занятием их научно-исследовательской работой. По результатам научно-исследовательской работы студенты отмечались на Всесоюзных и республиканских конкурсах. Большой золотой медалью МинВуза СССР на-

гражден студент Протасов Ю.И. Многие студенты были награждены медалями (Муратова Е.А., Долгих Н.Ю.), дипломами и почетными грамотами на Всероссийских конкурсах по естественным и математическим наукам, по разделам «Прикладная математика», «Техническая кибернетика» и «Вычислительная техника».

Окончив университет, многие из выпускников активно продолжают заниматься научной работой. Свыше 50 выпускников защитили кандидатские диссертации, а девять – докторские диссертации.

Следует отметить и высокий уровень подготовки студентов по программированию на кафедре, здесь, несомненно, заслуга преподавателей Шкатовой Г.И. и Рыбалка С.А. Команды ТПУ, в состав которых входят студенты кафедры прикладной математики, постоянно занимали призовые места на олимпиадах по программированию на всех уровнях от институтского до Всесоюзного и международного. Работой по организации дипломирования студентов и их распределением все годы активно занимается на кафедре доцент Вадутова Ф.А.

Кафедра включается в международное образовательное пространство, устанавливает связи с зарубежными университетами и наши студенты имеют возможность проходить обучение и стажировки за рубежом. Научно-исследовательской работе на ка-



Рис. 2. Аналоговый вычислительный комплекс (АВК32), 1978 г.



Рис. 3. Диалоговый вычислительный комплекс (ДВК-2), 1981 г.



Рис. 4. Коллектив кафедры прикладной математики. Сверху вниз и слева направо: Рыбалка С.А., Шевелев Г.Е., Гальченко В.Г., Офицеров В.В., Кочегуров А.И., Орлов О.В., Шаропин К.А., Зимин В.П., Моисеенко А.В., Вадутова Ф.А. Титаренко Е.Ю., Берестнева О.Г., Калинина Т.А., Бабушкин Ю.В., Звигинцев И.Л., Огородников А.С., Козловских А.В., Марьясов Д.А., Гергет О.М., Степанов Д.Ю., Самочернова Л.И. Моисеенко Н.Б., Константинова Л.И., Коваль Т.В., Григорьев В.П., Кочегуров В.А., Иванченков В.П., Гладкова Т.А., Миненко Л.И., Шкатова Г.И.



Рис. 5. Участники второй конференции выпускников кафедры ПМ

факультете по-прежнему уделяется повышенное внимание. При этом развиваются как сложившиеся на кафедре направления НИР, так и новые, ставшие актуальными в последнее время в области экономики, экологии, психологии и других отраслей науки. Научно-исследовательская работа проводится как на хозяйственной основе, так и по индивидуальным научным грантам. По тематике моделирования плазменно-пучковых систем кафедра имеет тесные научные связи с ИСЭ СО РАН. Здесь активно ведутся работы под руководством профессоров Григорьева В.П., Коваль Т.В. К решению научных задач активно привлекаются студенты кафедры, на кафедре работают научные семинары по вышеперечисленным направлениям. Ежегодно на кафедре проходят защиты диссертаций. В настоящее время готовятся к защите ассистенты Звигинцев И.Л. и Вагин Е.С.

Начиная с семидесятых годов, кафедра проводит научные конференции, в которых активное участие принимают ее выпускники. В ноябре 2012 г. в ТПУ прошла Всероссийская научная конференция с международным участием «Информационные и математические технологии в науке, технике, медицине», посвященная 40-летию кафедры ПМ.

Сотрудники кафедры входят в состав международных научных обществ. Профессора В.П. Григорьев и В.А. Кочегуров, О.Г. Берестнева, доцент А.И. Кочегуров являются членами международной академии информатизации, доцент В.П. Иванчиков — членом Европейского Оптического общества.

Создана научная школа «Моделирование процессов в медицине и социальной сфере». Направление возглавляет д.т.н., профессор-консультант кафедры прикладной математики Кочегуров В.А. и д.т.н., профессор кафедры прикладной математики

Берестнева О.Г. Получен сертификат Российской Академии Естественных наук о признании Научной школы на кафедре прикладной математики. Разработаны физические основы, алгоритмическое и программное обеспечение энергоинформационного представления функциональных особенностей организма в задачах лечебно-профилактической медицины (основатель профессор Кочегуров В.А.). По данному направлению защищены: одна докторская и две кандидатские диссертации, издано 10 монографий, получены два патента, свидетельство о регистрации программы на ЭВМ, открыта аспирантура. В настоящее время в аспирантуре обучаются 5 выпускников кафедры, один сотрудник кафедры обучается в докторантуре. В научной работе активно участвуют студенты, магистранты.

Во всех делах кафедры принимают активное участие наши замечательные сотрудники учебно-вспомогательного персонала: Гоптарь А.Ф., Гладкова Т.А., Моисеенко А.В., Григорьев А.В., Трегубова Л.К.

Отмечая свой 40-летний юбилей, коллектив кафедры полон решимости достойно влиться в ряды элитных образовательных подразделений с международным признанием, и все предпосылки этому имеются.

В заключение хотелось бы поблагодарить всех, кто принимал активное участие и оказывал помощь в проведении праздничных мероприятий в связи с настоящим юбилеем, а также поздравить студентов, выпускников и коллег с Праздником, желаем крепкого здоровья и больших успехов во всех Делах!

Поступила 06.10.2012 г.

Наши юбиляры

ПРОФЕССОРУ А.Ф. ТУЗОВСКОМУ – 60 ЛЕТ



1 августа 2012 г. исполнилось 60 лет доктору технических наук, профессору каф. ОСУ ТПУ Анатолию Федоровичу Тузовскому.

В 1975 г. А.Ф. Тузовский окончил обучение на кафедре АСУ (ныне – кафедра «Оптимизации систем управления») факультета управления и организации производства Томского политехнического института по специальности «Исследование операций» и распределился в отдел «АСУ городского хозяйства» лаборатории управления, созданной при этой же кафедре. В то время начались работы по созданию и практическому использованию методов математического моделирования и программирования для отраслей городского хозяйства г. Томска, таких как пассажирский транспорт, водо- и теплоснабжение. Разработанные сотрудниками отдела модели реализовывались в виде программных систем для ЕС ЭВМ.

Учитывая успешные результаты выполненных работ, в 1977 г. А.Ф. Тузовскому было предложено

поступить в аспирантуру при кафедре АСУ. Результатом обучения в аспирантуре была защита в 1980 г. кандидатской диссертации по теме «Вопросы оптимизации оперативного управления движением пассажирского транспорта на маршрутах» (научный руководитель И.П. Макаров). В своей диссертации А.Ф. Тузовский разработал, исследовал и программно реализовал методы дискретного оптимального управления маршрутным транспортом в критических ситуациях.

После защиты диссертации Анатолий Федорович перешел работать на кафедру автоматизированных систем управления ассистентом, затем старшим преподавателем, а впоследствии доцентом. Преподавал дисциплины, связанные с математическим моделированием и компьютерным программированием. Одновременно занимался внедрением результатов своих исследований не только в г. Томске, но и в других городах Российской Федерации (в таких, как Омск и Казань).

В 1989 г. в связи с активным участием УНПК «Кибернетика» в отраслевой программе «Нефть и газ Томской области» Анатолий Фёдорович приступил к научно-практической работе на должности ведущего научного сотрудника группы «Компьютерной томографии». С 1989 по 1996 г. при его активном участии была разработана программная система «Виртуальный томограф недр», которая была внедрена практически во все крупные нефтегазодобывающие организации Западной Сибири.

С 1997 г. Анатолий Фёдорович работал на кафедре ОСУ на должности доцента, а с 2000 г. также является заведующим лаборатории «Корпоративные системы управления знаниями». Под его руководством сотрудниками лаборатории выполнено несколько крупных хозяйственных работ с различными организациями. В 2001 г. нефтяная компания «ЮКОС» инициировала проект «Система управления знаниями». В рамках данного проекта в 2002 г. была разработана «Система управления результатами научно-технической деятельности компании», которая была внедрена в двух нефтегазодобывающих объединениях и центральном офисе компании. В 2003 г. был разработан Интернет-портал управления явными и неявными знаниями института Heriot-Watt ТПУ. В 2005 г. группой КСУЗ был выполнен проект разработки базовых

элементов системы управления знаниями для компании «ЭлеСи» (Томск).

В 2003 г. А.Ф. Тузовский поступил в докторантуру ТПУ для подготовки докторской диссертации. А в 2007 г. защитил диссертацию на соискание степени доктора технических наук на тему «Онтолого-семантические модели в корпоративных системах управления знаниями» (научный консультант — проф. Ямпольский В.З.). В 2008 г. Анатолий Фёдорович был избран на должность профессора кафедры оптимизации систем управления. Имеет более 100 публикаций и 8 свидетельств об официальной регистрации программ на ЭВМ в Роспатенте и Отраслевом фонде алгоритмов и программ. Под его руководством защищены две кандидатские и 7 магистерских диссертаций.

По результатам учебной и научно-исследовательской работы в 2005 г. Тузовский А.Ф. был признан победителем конкурса на звание «Доцент года ТПУ». Монография «Системы управления знаниями (методы и технологии)», подготовленная им совместно с соавторами, получила диплом 2 степени на конкурсе монографий ТПУ, выпущенных в 2005 г.

За заслуги в научной и педагогической деятельности в 2012 г. А.Ф. Тузовский награжден званием «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

ПРОФЕССОРУ А.М. МАЛЫШЕНКО – 75 ЛЕТ



1 октября 2012 г. исполнилось 75 лет Александру Максимовичу Малышенко – доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой интегрированных компьютерных систем управления Томского политехнического университета.

После окончания в 1954 г. с серебряной медалью средней школы в г. Гурьевске Кемеровской области А.М. Малышенко поступил на электромеханический факультет Томского политехнического института (ТПИ), который с отличием окончил в 1959 г. по специальности «Электрификация промышленных предприятий». Вся последующая трудовая деятельность А.М. Малышенко связана с ТПУ. Распределение на работу он получил на кафедру автоматики и телемеханики (АиТ), которая была организована в институте 1 сентября 1958 г. на электромеханическом факультете и стала выпускающей для специальности «Автоматические, телемеханические и электроизмерительные приборы и устройства» (набор на нее был осуществлен в 1956 г. на радиотехническом факультете).

Кафедра автоматики и телемеханики ТПИ в тот период еще не имела высококвалифицированного профессорско-преподавательского состава, необходимого для обеспечения учебного процесса лабораторного оборудования. В этой связи уже в первый год работы ассистентом на этой кафедре А.М. Малышенко ведет лекционные занятия по дисциплине «Системы синхронной связи и следящие системы», организует по ней разработку лабораторных работ и проводит их со студентами. Через год работы он был избран на должность старшего преподавателя кафедры АиТ, а еще через год направлен в целевую аспирантуру на кафедру авто-

матики и телемеханики Московского энергетического института, где под руководством доцента (впоследствии профессора) Л.И. Ткачева проводил диссертационные исследования, связанные с повышением точности корабельных инерциальных навигационных систем. В этом же институте состоялась и успешная защита его кандидатской диссертации.

После завершения аспирантуры А.М. Малышенко вернулся на кафедру автоматики и телемеханики ТПИ (входившую с 1961 г. уже в состав факультета автоматики и вычислительной техники) и работал на ней в должности ассистента, затем старшего преподавателя. С октября 1966 г. был утвержден в должности заведующего этой кафедрой и руководил ею в течение 16 лет (вплоть до мая 1982 г.).

Кафедра автоматики и телемеханики в период руководства А.М. Малышенко стала одной из крупнейших выпускающих кафедр института, обеспечивающей подготовку инженеров по специальности «Автоматика и телемеханика» на дневном, вечернем и заочном отделениях с ежегодным набором студентов на все эти формы обучения в 200 человек. Долгое время она была единственной кафедрой, готовившей инженеров такого профиля в Азиатской части страны. Её выпускники получали распределение на предприятия и в организации не только Сибири, но и Дальнего Востока, Средней Азии и Урала. Среди выпускников кафедры АиТ в период руководства ею А.М. Малышенко несколько человек удостоены звания Заслуженного деятеля науки, лауреата Государственной премии, многие стали докторами и кандидатами наук,

руководителями предприятий, ведущими специалистами по автоматизации технологических процессов и производств.

С 1981 г. на кафедре АИТ по инициативе А.М. Малышенко была организована, наряду с подготовкой инженеров по специальности «Автоматика и телемеханика», и подготовка инженеров по новой для того времени в стране специальности «Роботы и робототехнические системы» (также впервые за Уралом) с ежегодным набором на первый курс 50 студентов. В этой связи кафедра АИТ была преобразована в кафедру автоматизации и робототехники, а в декабре 1986 г. разделена на кафедру автоматизации и телемеханики и кафедру робототехнических систем.

В период с 1986 по 2003 гг. А.М. Малышенко работал в должности доцента, а с 2003 по 2007 гг. – в должности профессора кафедры робототехнических систем. С 1 октября 2007 г. по настоящее время А.М. Малышенко заведует этой кафедрой, преобразованной в конце 2007 г. в кафедру интегрированных компьютерных систем управления (ИКСУ). В 2002–2003 гг. по его инициативе и при непосредственном участии в разработке необходимой для лицензирования документации Томский политехнический университет получил право подготовки инженеров по специальностям «Мехатроника» и «Автоматизация технологических процессов и производств в нефтегазовой отрасли», по которым кафедра ИКСУ стала готовить инженеров наряду с подготовкой бакалавров и магистров по направлению «Автоматизация и управление».

А.М. Малышенко по праву называют одним из ведущих методистов университета. С 1967 по 1983 гг. он входил в состав Научно-методического совета ТПИ и руководил в нем до 1983 г. методической комиссией по учебным планам и программам. В этот период по его инициативе была проведена большая работа по методическому обеспечению процессов формирования рабочих учебных планов и полных комплектов рабочих программ учебных дисциплин по всем специальностям института, за которую Александр Максимович был награжден бронзовой медалью ВДНХ СССР. В этот же период он активно работал в составе Научно-методической комиссии по специальности «Автоматика и телемеханика» и Научного совета по приборостроению, электронике, вычислительной технике и автоматике Министерства высшего образования страны. В последующем, в 2002–2008 гг. А.М. Малышенко в составе Научно-методического совета университета руководил комиссией по совершенствованию образовательной деятельности. Свыше 15 лет он является членом Научно-методического совета Минобрнауки РФ по мехатронике и робототехнике, членом двух методических комиссий (по системному анализу и управлению, мехатронике и робототехнике) Сибирского регионального учебно-методического центра (СибРМУЦ).

Целый ряд организационно-нормативных документов, используемых в университете, разработан А.М. Малышенко. В частности, «Руководящие материалы по планированию работы преподавателей», «Индивидуальный план работы преподавателя ТПУ», «Положение об издательской деятельности Томского политехнического университета», «Положение о редакционно-издательском совете ТПУ», «Положение о структурном подразделении ТПУ «Издательство Томского политехнического университета». По инициативе А.М. Малышенко и под его редакцией в 2005 г. было разработано «Временное положение об организации учебного процесса с использованием кредитных и балльно-рейтинговых оценок освоения образовательных программ», в 2006 г. – практическое руководство «Подготовка к изданию учебников и учебных пособий для вузов», а в 2007 г. – «Положение об организации разработки учебно-методического обеспечения Инновационной образовательной программы развития в университете опережающей подготовки элитных специалистов и команд профессионалов мирового уровня по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий».

В 2004 г. А.М. Малышенко издал учебное пособие «Математические основы теории систем», которое было переиздано в 2008 г. и получило в УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации гриф учебника для студентов вузов России, обучающихся по направлению подготовки «Автоматизация и управление». В соавторстве с доцентом О.С. Вадутовым в 2008 г. было издано не имеющее аналогов в России учебное пособие «Сборник тестовых задач по теории автоматического управления».

А.М. Малышенко проводит большой объем научных исследований, основными направлениями которых являются управление подвижными объектами, квалиметрия фундаментальных свойств управляемых объектов и систем, а также теория систем автоматического управления с избыточной размерностью вектора управления. Результатам исследований этого класса систем была посвящена его докторская диссертация, успешно защищенная в 1995 г. Они изложены в опубликованной в 2005 г. монографии «Системы автоматического управления с избыточной размерностью вектора управления».

Становление и развитие в ТПУ факультета автоматизации и вычислительной техники (АВТФ), Института кибернетики проходило при непосредственном участии профессора А.М. Малышенко. Это позволило ему подготовить к печати и издать к 40- и 50-летию АВТФ юбилейные издания, отражающие все этапы и грани бытия одного из ведущих факультетов университета.

Юбилея можно считать основателем в университете научной школы по управлению подвижными объектами. Под его научным руководством и при непосредственном участии выполнено свыше 30 хозяйственных и госбюджетных НИР и ОКР,

в том числе ряд НИР по заказам Комиссии по военно-партийным вопросам страны.

А.М. Малышенко подготовил двух докторов и 16 кандидатов наук, является автором 13 изобретений, 10 монографий и свыше 250 научных и научно-методических работ, редактировал несколько учебных изданий и научно-технических сборников. Он принимает активное участие в аттестации инженерных и научных кадров, будучи членом двух диссертационных советов по присуждению ученых степеней докторов наук при ТПУ и одного докторского совета при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУРе), длительное время был в ТУСУРе председателем Государственной аттестационной комиссии по специальности «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств».

В 1996 г. А.М. Малышенко избран членом-корреспондентом, а в 2012 г. – действительным членом Академии электротехнических наук России, в 2002 г. – действительным членом Международной академии наук высшей школы.

За многолетнюю плодотворную учебную, научную, методическую и воспитательную работу в вузе А.М. Малышенко награжден орденом Дружбы, медалями «За трудовое отличие», «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина», «Ветеран труда», знаком «Почетный работник высшего образования России», а также неправительственными медалями: «За службу Отечеству» Политического консультативного центра РФ и «100 лет профсоюзам России» Федерации независимых профсоюзов России. Ему присвоены звания «Европейский преподаватель инженерного вуза», «Заслуженный профессор Томского политехнического университета». За вклад в развитие университета награжден медалями II и I степени «За заслуги перед Томским политехническим университетом», а за заслуги перед городом Томском – медалью «400 лет Томску».

По итогам работы за 2001 и 2005 гг. в конкурсе среди профессорско-преподавательского состава университета А.М. Малышенко был удостоен звания «Профессор года».

ПРОФЕССОРУ В.И. ГОНЧАРОВУ – 75 ЛЕТ



Гончаров Валерий Иванович родился 15 августа 1937 г. в районном центре Онгудай Республики Алтай. Однако последующие пятнадцать лет его жизнь проходила в другом райцентре – Кузедеево Кемеровской области, где он окончил школу и откуда в 1955 г. поехал поступать в Томский политехнический институт на радиотехнический факультет. Выбор, скорее всего, был неслучайным. Его родители работали в учреждениях связи, причем отец – И.Н. Гончаров – имел непосредственное отношение к радиосвязи. После окончания курсов радиотехников Ивана Николаевича направили в Онгудай для радиофикации села, где не было даже электричества, не говоря уж о кадрах, радиоприемниках, усилителях, проводах и т. п. И все-таки через год «радиоточки» появились!

Время учебы в ТПИ с 1955 по 1960 гг. для В.И. Гончарова, как и для многих людей, прошедших студенческую школу, вспоминается как лучший период жизни. Среди преподавателей, которых Валерий Иванович запомнил как неординарных учителей, профессор С.П. Кузнецов, деканы И.И. Калыцкий (впоследствии ректор ТПИ) и Г.С. Зубарев (впоследствии ректор ТУСУРА), зам. декана В.М. Белоусов, доцент Ф.И. Перегудов (впоследствии директор НИИ, ректор ТУСУРа, министр СССР), зав. кафедрой К.М. Шульженко, а также создатели сибирских телевизионных центров, работавших под руководством В.С. Мелихова.

После окончания института В.И. Гончаров стал работать в Базовой лаборатории автоматики Томского совнархоза при ТПИ, затем на кафедре № 0544 факультета автоматических систем. Этот период работы тоже оставил яркий след в жизни юбиляра. В то время в интересах оборонной про-

мышленности был образован новый факультет с несколькими кафедрами соответствующего профиля. Их комплектование происходило в основном за счет недавних выпускников института, что способствовало созданию в коллективах атмосферы товарищества, перспектив развития, возможностей достижения любых целей. Этому в большой степени способствовал стиль руководства кафедрой доцентом В.М. Осиповым: он сам активно занимался наукой, не донимал сотрудников мелочной опекой, предоставляя им широкую свободу действий. Такая обстановка сыграла свою воспитательную роль: все молодые преподаватели защитили кандидатские диссертации, а позднее двое из них – докторские.

В 1967 г. Валерий Иванович поступил в аспирантуру (руководитель – доцент В.М. Осипов), в 1970 г. защитил кандидатскую диссертацию «Некоторые вопросы моделирования объектов с распределенными параметрами». Были разработаны новые решения в описании и моделировании широкого класса объектов управления, по которым получены два авторских свидетельства на изобретения.

После защиты диссертации открылся традиционный для высшей школы путь: подготовка новых курсов, их периодическая смена, проведение различных занятий, организационная и воспитательная работа и т. д. В этот же ряд естественно входила и научная работа. В.И. Гончаров продолжил направление исследований, которое было определено в кандидатской диссертации. Эта работа не только приносила удовлетворение, как любая творческая работа, но и позволила обобщить полученные результаты до уровня метода расчета широкого класса систем автоматического управления.

Это была основа будущей докторской диссертации. В эти же годы Ф.А. Вадутова первой защитила кандидатскую диссертацию, направленную на развитие этого метода.

В те годы было практически необходимым участвовать в общественной работе, которая была значимой и полезной. В.И. Гончарова избирали на факультете председателем профбюро и секретарем партбюро, длительное время он работал в составе партийного комитета института. Судьба свела Валерия Ивановича с интересными людьми – секретарями парткома В.Я. Ушаковым и В.А. Кочегуровым. Они обладали и сохранили до сих пор яркие индивидуальные черты характера, импонирующие людям, убедительную логику мышления, необычные взгляды на многие события. В настоящее время те формы общественной работы оценивают по-разному, но Валерий Иванович вспоминает их как интересные и, безусловно, во многом эффективные. Эта работа стала для Валерия Ивановича определенной жизненной школой.

Прошли времена «застоя» и «перестройки», наступили сложные 90-е гг. В.И. Гончаров занялся систематизацией материалов для оформления докторской диссертации. По этим материалам была издана монография, а 1995 г. состоялась защита докторской диссертации «Вещественный интерполяционный метод в задачах автоматического управления». В работе предлагался подход к расчету систем автоматического управления, позволяющий распространить на традиционные методы расчета динамических систем численные методы и возможности цифровой вычислительной техники. Результат – сокращение почти в два раза числа операций. Предложение было настолько необычным, что его оценки зачастую были противоположными: от «нельзя таким малым количеством точек представить модель динамической системы» до «как же это мы, используя преобразования Лапласа и Фурье, не видели третьего варианта?». Точки над *i* расставил Бюллетень ВАК в обзоре утвержденных за год диссертаций по специальности «Управление в технических системах»: «К наиболее значимым и интересным диссертациям следует отнести...». Далее следует перечень из трех работ, начинающийся с работы В.И. Гончарова.

В последующие годы шло развитие и обобщение метода, в том числе аспирантами и магистрантами. Всего по этой тематике было защищено пять кандидатских диссертаций, одна из них подготовлена аспирантом из дальнего зарубежья. Разработанное направление расчета динамических систем нашло отражение в обучении магистрантов: читается соответствующая дисциплина, изданы два учебных пособия, выполнены и защищены выпускные квалификационные работы.

Разработанный метод был использован при выполнении нескольких хозяйственных работ, реализован в патентах. По одному из них – «Способ самонастройки системы управления объектом и устройство для его реализации» – в ЗАО «Элеси»

разработан самонастраивающийся регулятор для насосно-перекачивающих станций магистральных нефтепроводов. Такие регуляторы установлены на двух десятках НПС. Это важное достижение для трубопроводного транспорта.

На основе созданного метода выполнен ряд зарубежных контрактов. О них следует сказать особо, так как они отражают научно-технические связи с зарубежными партнерами. В частности, специалисты одной из компаний Республики Корея заинтересовались этим методом в 2005 г. Последовавшие затем контакты привели к созданию в 2006 г. в ТПУ Международной научно-образовательной лаборатории мехатроники, научным руководителем которой был назначен Валерий Иванович Гончаров. Это была платформа для контрактов, совместных научно-технических семинаров в технопарке г. Бучен и ТПУ. Перспективы были настолько велики, что их развитию решил способствовать мэром города Бучен (это город с населением около одного млн. человек!), посетивший ТПУ во главе большой делегации.

На основе вещественного интерполяционного метода и его исследований в МНОЛ мехатроники была обоснована возможность создания серии приборов для настройки и контроля систем автоматического управления. Головной прибор, предназначенный для экспериментального определения математических моделей объектов управления, доведен до уровня, обеспечивающего его серийное производство. По этому поводу ведутся переговоры в Корее и Китае, рассматривается вопрос подготовки производства в Томске. Важно, что все приборы серии либо обеспечены патентной защитой, либо имеют технические решения, которые могут составить предмет изобретения. Последняя возможность сохраняется для потенциального партнера по выпуску, обеспечивая наличие двух равноправных патентообладателей – ТПУ и партнера.

В МНОЛ мехатроники совместно с докторантом Аврамчуком В.С. разрабатывается еще одна серия приборов. Она основана на изобретении «Способ частотно-временного корреляционного анализа цифровых сигналов». Привлечение сведений о частотном спектре сигналов позволяет значительно повысить точность корреляционного анализа. Первый прибор серии «Прибор для определения утечек трубопроводных систем» доведен до макетного образца, рассматривается вопрос о серийном производстве.

Валерий Иванович продолжает активно работать, о чем свидетельствуют принятые в вузах показатели. Например, за последние пять лет подготовлены и защищены кандидатские диссертации тремя аспирантами, два из которых – из дальнего зарубежья; опубликовано 40 работ, из которых одно учебное пособие, четыре патента, 35 статей, в том числе пять – в изданиях РАН, 15 – в зарубежных изданиях.

Пожелаем Валерию Ивановичу долгих плодотворных лет жизни!

Summaries

UDC 519.2

Rozhkova S.V.
OPTIMAL DISCRETE-CONTINUOUS SIGNAL MEMORY
CHANNEL TRANSMISSION AT QUIET FEEDBACK

The article considers the task of optimal transmission of stochastic processes through the discrete-continuous memory channels at quiet feedback in observations. The author has proved the extremal properties of optimal coding in the term of information amount maximization.

UDC 519.2

Rozhkova S.V.
OPTIMAL DISCRETE-CONTINUOUS SIGNAL
DELAY CHANNEL TRANSMISSION

The article considers the task of optimal transmission of stochastic processes through the discrete-continuous delay channels. The author has proved the extremal properties of optimal coding in the term of information amount maximization.

UDC 681.51

Balasyan S.Sh.
COMPUTER MODEL OF ELEMENTS LINK I
N STRICTLY HIERARCHICAL STRATIFIED SYSTEM

The author has developed the computer model of elements link in strictly hierarchical stratified system allowing reducing the element link imitation in adjacent strata (the formation of input signal of each strata based on output signal of the previous strata) to a standard operation of matrix multiplication. It was shown that the proposed model admits the paralleling imitation of signaling from each strata elements to the next strata elements; it affords the opportunity to accelerate considerably the imitation when using multiprocessor computers. The application of the proposed link model allows introducing when carrying out the computer experiments the required changes into the neighbor strata adjacency matrices according to the competitive versions of the structures in the system under study without changes in basic simulation program.

UDC 519.872

Nazarov A.A., Yampolsky V.Z., Yatsenko M.A.
MULTIMODALITY OF HIGH-INTENSITY SEMI-MARKOV
STREAM AT EXTREMELY RARE CHANGES OF ITS STATE

The authors have developed the mathematical model of telecommunication stream in the form of high-intensity semi-Markov stream at extremely rare changes of its states which possesses the multimodality property of distributing the possibilities of its event number per unit time. The article demonstrates the linear dependence of its features on stream observation time.

UDC 519.872

Sinyakova I.A., Moiseeva S.P.
THE MOMENT METHOD FOR STUDYING
THE MATHEMATICAL MODEL OF PARALLEL SERVICE
OF MULTIPLE DEMANDS IN THE STREAM OF MARKOV
RESTORATION

The authors propose the mathematical model of parallel service of multiple demands in the form of queuing system with blocks functioning in parallel. The main probabilistic features of two-dimensional process characterizing the number of demands being in service have been determined by the moment methods.

UDC 681.50

Gayvoronsky S.A., Ezangina T.A.
SYNTHESIS OF LINEAR ROBUST CONTROLLERS
IN THE INTERVAL SYSTEMS USING MDSLS

The authors have developed the software for synthesizing the automated control systems with the guaranteed root quality indices. The implementation algorithms are based on robust extension of the system quality index estimation. The article introduces the numerical examples.

UDC 665.6/.7; 004.942

Usheva N.V., Moyzes O.E., Kuzmenko E.A., Khlebnikova E.S.
THE DEVELOPMENT OF OPTIMIZATION MODULE
AND STUDY OF GAS CONDENSATE FIELD TREAT
MENT APPLYING MODELING SYSTEM

The authors have developed the optimization module to search for the most efficient process conditions for gas condensate field treatment. The investigations were carried out applying the modeling system of thermobaric parameters influence on low-temperature separation; the optimal process conditions were determined.

UDC 004.415.2:533.9

Li A.M., Sankov A.A., Pavlov V.M., Abankin A.S.
THE ANALYSIS OF ALGORITHM FOR COMPUTING
THE PLASMA COLUMN SHAPE IN KTM TOKAMAK FROM
THE POINT OF VIEW OF PARALLEL COMPUTING

The article introduces the analysis of algorithm for computing the plasma column shape concerning parallel computing; the authors have obtained the estimates of performance indices of parallel algorithm and the required number of processors for achieving maximum speed in computing plasma shape of KTM tokamak. Based on the obtained efficiency indices values the authors have stated the requirement to calculating capacity of multiprocessor system required for computing plasma shape and controlling plasma in real time. The multiprocessor DSP cluster which will be used in plasma control loop has been selected by the results of the work.

UDC 004.9:622.276

Silich V.A., Yampolsky V.Z., Savelyev A.O., Komagorov V.P.,
Alekseev A.A., Grebenshchikov S.A.
APPLICATION OF OMSD METHODOLOGY FOR MODELING
THE SYSTEM FOR PLANNING WELL INTERVENTIONS

The article considers the planning of well interventions and the results of analysis of the existing support software for the process. The authors propose to use the OMSD methodology for domain modeling to further design of decision support system.

UDC 004.415.2

Grebenshchikov S.A., Silich V.A., Komagorov V.P.,
Fofanov O.B., Savelyev A.O.
THE TECHNIQUE FOR DEVELOPING THE DECISION SUPPORT
SYSTEM FOR CONTROLLING THE DESIGN WORKS AT
OIL AND GAS FIELDS CONSTRUCTION

The authors propose the technique for developing the decision support system for controlling the design works at oil and gas fields construction. The technique is based on object oriented methodology of system modeling assuming the successive formation and use of the models of development process, problem-containing and problem-solving systems for decision making.

UDC 519.175.1

Pogrebnoy V.K.
SOLVING THE PROBLEM OF DETERMINING
GRAPH ISOMORPHISM REPRESENTED
BY THE ATTRIBUTIVE MATRICES

The author proposes the algorithm of solving the problem of determining graph isomorphism. The attributes representing the object graph model are attributed to the vertices and edges of these graphs. The algorithm is based on the structural difference integration method modified for working with the attributive graph matrices. In order to determine the stable group isomorphism the author developed the rule of assigning abstract descriptors at free and dependent vertex differentiation in these groups. The algorithm functioning is shown by the example of isomorphism determination for two general graphs.

UDC 004.352.242

Grigoryev D.S., Spitsyn V.G.
APPLICATION OF NEURAL NETWORK AND DISCRETE
WAVELET TRANSFORM FOR ANALYZING
AND CLASSIFYING ELECTROCARDIOGRAMS

The authors have developed and introduced the system for analyzing and classifying the digital electrocardiograms based on application of wavelet transform and artificial neural network. The optimal configuration of system elements was selected. The authors analyzed the results of the numerical experiments in recognition of electrocardiograms with arrhythmia and normal sinusoidal rhythm.

UDC 519.174.1

Pogrebnoy A.I.V., Pogrebnoy V.K.
THE TASK OF DECOMPOSITION OF OBJECT SET
IN GEOGRAPHICALLY DISTRIBUTED SYSTEM INTO
SUBSETS OF UNEQUAL POWER

The article considers the task of compact decomposition of object set in geographically distributed system into subsets the number and power of which may vary within the specified value interval. The notions of natural and relative object collection are introduced. The authors have developed the method for extracting collections. It is used the compact object sets and density function and the graph of compact set paired intersection obtained on their base. The solution of decomposition task is reduced to matching the best fit between the collections and subsets.

UDC 004.415.5:004.896

Kudinov A.V.
INFORMATION TECHNOLOGY FOR SOLVING
THE PROBLEMS OF DATA MINING OF PRODUCTION DATA

The author proposes the original technique for solving the problems of data mining of the production data at the industrial enterprises. The work describes the concept of developing such technique including the typical architecture of BI-system, approaches to designing and implementing central warehouse of the production data, subject data mart as well as the way of implementing the models of production data analysis based on Data Mining technique. The article introduces the example of solving the analysis applied problem by the real data of the industrial enterprise.

UDC 519.688:622.276.5.001.42

Gavrilov K.S., Sergeev V.L.
ADAPTIVE INTERPRETATION OF NONSTATIONARY STATE
HYDRODYNAMIC RESEARCHES IN THE SYSTEM
«POOL-WELL» BY THE INTEGRATED MODEL TECHNIQUE

The article considers the issues of increasing the information content of the techniques for interpreting the nonstationary hydrodynamic researches in the system «pool-well». The authors have proposed the approach to their solution based on application of integrated model technique and the adaptive interpretation technique. The article demonstrates the examples showing the advantages of the proposed approach.

UDC 004.415

Solomatov D.V., Afonin S.V., Belov V.V.
APPLICATION OF ALGORITHMS
FOR RECORDING CLOUDINESS
IN THE PROBLEM OF ATMOSPHERIC
CORRECTION OF SATELLITE DATA ETM+/LANDSAT

The article considers the issues of atmospheric correction of satellite measurements within the visible spectrum region. The authors have analyzed the existing software for atmospheric data correction in the widely used satellite systems, their advantages and disadvantages. The architecture of software for atmospheric correction of satellite measurements is introduced. The article considers the implementation of algorithms for obtaining cloudy mask and removing semitransparent cloudiness by the example of the image obtained by ETM+ device from the satellite Landsat7.

UDC 004.54

Boychenko I.V., Bortnikov E.V., Nemerov A.A.
APPLICATION OF UniTESK TECHNIQUE
FOR FUNCTIONAL TESTING THE MANAGEMENT
SYSTEM OF BROADBAND WIRELESS
ACCESS NETWORK OF IEEE 802.16 STANDARD

The article describes the UniTESK technique and its application for functional testing the management system of broadband wireless access network of IEEE 802.16 standard (WiMAX). It is shown that the UniTESK technique is rather simple and efficient for testing the event-driven systems. The pattern of interaction of test and target systems is considered.

UDC 004.021

Boychenko I.V., Kulbaev S.S., Nemerov A.A., Golenkov V.V.
THE EXPERIMENT IN FRACTAL COMPRESSION
OF RGB-IMAGES AT COMPUTER CLUSTER

The article describes the experiment in compression of full-color images based on fractals applying a high-performance computing system with distributed memory – the computer cluster. Inter-process exchange is carried out on the basis of MPI technology. The linear dependence of computation time on a number of computational processes is shown. The authors have determined the irregularity in computation processes load caused by heterogeneity of the images compressed. The article introduces the comparison of the quality and the size of the images compressed based on fractals and JPEG algorithm.

UDC 004.55

Banokin P.I., Vichugov V.N.
THE SYSTEM OF SEMANTIC
OPTIMIZATION OF WEB-SITE CONTENT
ON THE BASIS OF USER INCLINATIONS

The authors have revealed the requirement in web-site content optimization according to individual user inclinations. They propose the methods of web page content optimization for different scenarios of using application and the ways of storing the user semantic profile. The article introduces the implementation of program system in the form of JavaScript-components set and the technique for integrating the system with the existing web-applications.

UDC 004.021:614.84

Sonkin M.A., Leshchik Yu.V.
APPLICATION OF FUZZY SEARCH
ALGORITHMS IN THE SYSTEMS FOR MONIT
ORING FIRE SITUATION IN THE FORESTS

The article considers the fuzzy search algorithms in relational databases. It is shown that the use of standard text search algorithms and fuzzy queries concerning the systems for monitoring fire situation in the forests is rather efficient. The authors have proposed the approach to implementation of fuzzy search in relational database on the basis of standard algorithms combining.

UDC 621.313.333:62–83

Glazyrin A.S., Bolovin E.V.
IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF INDUCTION MOTORS WITH STATIONARY SQUIRREL-CAGE ROTOR BASED ON DIFFERENCE SCHEMES

The authors have developed the method for identifying parameters of dynamic models of induction motors with stationary squirrel-cage rotor based on solution of difference schemes system. The multipoint approximation of the first and the second derivatives was applied for digital differentiation. The parameters of the induction motor model were determined with a permissible error. The authors proved the operating capacity and the efficiency of the dynamic identification when using the developed method.

UDC 621.313.333.2

Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S.
THE PRINCIPLE OF DESIGNING THE FAULT-TOLERANT SYSTEM FOR CONTROLLING THE INDUCTION MOTOR DRIVE

The authors have proposed the method for designing the fault-tolerant system for controlling the induction motor drive. The article considers the ways of the control system adaptation to the transients occurring in the motor drive when changing the control technique. The transients in the developed motor drive system have been studied by simulation.

UDC 681.51.01

Utanan S.A., Polishchuk V.I.
SYNTHESIS OF MINIMUM DEGREE FILTER FOR SYNCHRONOUS GENERATOR DIAGNOSTICS

The interaction between the levels and spectral compositions of the desired signal and the restrictions of synchronous generator diagnostics has been mathematically proved. The authors developed the method for synthesizing minimum degree filter supporting the best signal-to-noise ratio.

UDC 519.6:004.93

Avramchuk V.S.
DETERMINING THE PRESENCE OF HARMONIC COMPONENTS AND THEIR FREQUENCIES IN DISCRETE SIGNALS BASED ON AUTOCORRELATION FUNCTION

The author has proposed and tested the method for determining the presence of harmonic components and their frequencies in discrete signals based on solution of time-frequency autocorrelation function. It was shown that this method allows determining correctly the presence of periodic signals and their frequencies in the signal studied.

UDC 519.87

Gergat O.M., Kochegurov V.A.
THE USE OF ENERGY AND INFORMATION INDICATORS WHEN ESTIMATING THE STATE OF MEDICAL SYSTEM FUNCTIONING

The problem of using energy and information indices for estimating a bioobject health state is discussed in the article. The authors have studied the dynamic bio-system which is characterized by input, output and state vector. The change of the latter is provided with the exchange energy processes occurring inside and supported by energy entry from outside. The article considers the methods which allow carrying out the individualized approach to decision making in the applied medicine problems.

UDC 519.72

Fokin V.A., Pekker Ya.S., Berestneva O.G., Gergat O.M.
THE INTEGRAL METHODS FOR ESTIMATING THE COMPLEX SYSTEM STATE

The authors have proposed the information technology of integral estimation of complex system state (by the example of bio-sys-

tems), providing the estimation algorithm unity on different levels of their structural-functioning arrangement. The article describes the entropic approach for estimating unstable states of bio-systems by the indicators of cardio-interval-metering. The examined models and algorithms have been tested on real data. The article introduces the illustrative example of the main types of information indicators dynamic of newborn infant cardiac rhythm.

UDC 004.048

Bessmertny I.A., Nugumanova A.B.
THE METHOD OF THESAURUS AUTOMATIC CONSTRUCTION ON THE BASIS OF NATURAL LANGUAGE STATISTICAL PROCESSING

The article considers the method of automatic construction of terms thesaurus in subject area based on natural language statistical processing. The application of the proposed method allows rejecting the experts manual work in forming and supporting thesaurus in urgent state.

UDC 004.4: 658.58

Kizim A.V., Kravets A.D., Kravets A.G.
GENERATION OF INTELLIGENT AGENTS FOR THE TASKS OF SUPPORTING THE MAINTENANCE AND REPAIR

The article considers the process of developing the model of generation of intelligent multi-agent systems. The idea of agent universal generator reflects the requirement of developers for optimization and acceleration of developing and changing the systems based on the model of interact intelligent agents. The generator allows using the wide range of intelligent techniques for developing the agents of multi-agent systems. The authors have tested the system of generating multi-agent systems on the tasks of supporting the equipment maintenance and repair.

UDC 004.8 + 620

Massel L.V., Massel A.G.
INTELLIGENT COMPUTING IN STUDYING THE DIRECTIONS OF POWER ENGINEERING DEVELOPMENT

The article considers the application of intelligent computing for decision making support in studies of directions in development of the country fuel-energy complex considering energy safety requirements. First of all they include the computations based on ontology, cognitive and event modeling. Recently the intelligent computing is expanded by application of Bayesian webs of trust for estimating the emergency risks in power engineering and declarative representations of data conversion. The intelligent IT-environment integrating the intelligent computing toolkit and providing the support of the proposed two-level research technology has been implemented.

UDC 004.4

Kuchuganov A.V.
BIOINSPIRED ALGORITHMS FOR SELECTING IMAGE INFORMATIVE CRITERIA

The article introduces the bioinspired algorithms based on achievements in modern visual mechanisms physiology. They allow increasing the quality of selecting the informative criteria on the image, analysis and extraction of knowledge from the images: operator-analyzer of local domains, selecting singular and outline points as well as the direction to the neighbor outline points; algorithms of correlation optimization and extrapolation correction of singular point position, dynamic adaptation of sensitivity and resolution of local analyzer.

UDC 519.688:53.083.98

Volkov Yu.V., Tartakovsky V.A.
ALGORITHM OF INCREMENT AREA RESTORATION BASED ON GEOMETRIC SINGULARITIES OF TREE-RINGS

The article considers the algorithm for determining the increment area and constructing the uniform pattern of tree-rings. The results of

numerical simulation and the results of comparison of the design growth parameters with the parameters obtained when analyzing the full-scale samples are introduced.

UDC 681.5

Voronin A.V., Shchelkanova T.A.
APPLICATION OF QUADRATIC PROGRAMMING WHEN SYNTHESIZING REGULATORS BY THE REAL INTERPOLATION METHOD

The article demonstrates the opportunity of using the quadratic programming method to extend the possibilities of real interpolation method for synthesizing the dynamic objects regulators concerning nonminimally-phase objects.

UDC 004.932

Phan Ngok Hoang, Bui Thi Thu Trang, Spitsyn V.G.
TEXT RECOGNITION BASED ON APPLICATION OF WAVELET TRANSFORM AND PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

The authors have proposed a new method for text recognition based on combination of Haar wavelet transform and principal component analysis. The algorithm and the software for text recognition were developed. The article introduces the example of operation and program testing results. It is shown that the use of the proposed original algorithm enables the efficient text recognition.

UDC 004.415

Hoang Van Kuet, Tuzovsky A.F.
INFERENCE CONTROL IN SEMANTIC DATABASES

The article considers the method for solving the problem of controlling user access to semantic databases containing simple statements consisting of three elements (triples). The application of this method does not allow admitting the obtaining of data using which the users may get logically the forbidden information. The authors set the task of controlling inferences based on the data obtained and proposed the algorithms for its solution.

UDC 666.9:681.5

Bazhanov A.G., Megergut V.Z.
FUZZY CHART OF LOAD NODE BEHAVIOR IN THE MAIN GEAR OF WET ROTARY CEMENT KILN

The article describes the development of fuzzy chart of load increment node behavior to the main gear of wet rotary cement kiln № 1 («Oskoltsement»). This node has been selected on the basis of its considerable role in the whole object control. It is proved not only by the opinion of industrial engineers and operators of the kiln but by statistic data obtained from the plant database as well. In order to construct the chart the authors have used the simplified models of balance and dynamics for sludge level in the kiln and its inertia moment which may be obtained based on the structure and technique of object operation. The chart is constructed on the basis of mathematical model data considering the dependent process values for the selected node. It describes fuzzy bounds between the input and output process values of the object that is conditioned by the complexity in its operation and control.

UDC 519.6

Sinyeva K.Ya., Kichkildinov V.S., Kalayda V.T., Belov V.M.
THE INDUCTIVE APPROACH TO MATHEMATICAL MODEL SELF-ORGANIZATION IN APPLICATION TO THE APPLIED METEOROLOGY PROBLEMS

The authors have developed the algorithm of recovery, short-term and long-term forecasting for meteorological value fields using the inductive approach ideas for model computer self-organization. They obtained the optimal complexity mathematical models of time-space short-term and long-term forecasting for short time periods as well as the recovery models by temperature vertical profile height in troposphere according to long-term observations of meteorological station Minsk (53°11'N, 27°32'E).

UDC 004.67

Gromakov E.I., Aleksandrova T.V., Liepinsh A.V., Malysenko A.M.
THE AUTOMATED MONITORING OF KEY INDICATORS FOR THE DESIGN ORGANIZATION ACTIVITY

The authors have studied the possibility for the design organization head to monitor automatically its current operation productivity including monitoring the load of machine used for design documents replication. The carried out prototype tests of possibilities of the proposed indicator monitoring system confirm the considerable growth of objectiveness and decrease of labor intensity at their estimation.

UDC681.324:519.17

Monakhov O.G.
THE EFFICIENT USE OF GRAPHIC ACCELERATORS AT PARALLEL OPTIMIZATION OF FINANCIAL STRATEGIES ON CLUSTER SYSTEM

The article describes the approach for financial strategies (algorithms) optimization based on indicators of financial and goods markets and evolutionary computations. The author introduces the parallel genetic algorithm applied for automating the search for optimal parameters of sales strategies from the point of view of earning yield maximization. Using the cluster system and GPU-accelerators it is shown experimentally that the proposed algorithm allows increasing earning capacity for financial strategies and has perfect scalability and acceleration at parallel computation at super computer with 53000 kernels.

UDC 658.012.2:122:338.53

Medvedko O.V.
THE CONSTRUCTION OF ITERATION METHOD FOR PRODUCTION PLANNING TASK AT PRICE UNCERTAINTY

The author has studied the iteration methods to solve the original problem using the Monte-Carlo and Benders methods and has constructed the iteration method for a wide class of price allocation for a case when there is no information on allocation function and there is a statistic database. The iteration method for the problems of production optimal planning at price uncertainty has been developed. The solutions obtained allow introducing the systems of optimal planning at industrial enterprises considering price uncertainty.

UDC 004.89

Razin V.V., Tuzovsky A.F.
THE DECISION MAKING METHOD BASED ON ANALYSIS OF SITUATIONS AND SEMANTIC TECHNOLOGIES

The authors propose the approach to construction of situation automated analysis system based on stack of Semantic Web techniques. The description of the approach includes a formal model for describing situations, basic ontologies implementing it and description of architecture of situation analysis system. The article introduces the example of situation description by interpreting the proposed formal model in terms of OWL-ontologies.

UDC 519.23

Dubinin D.V., Kochegurov A.I., Laevsky V.E. (Geringer V.)
ON THE MORPHOLOGY STATISTICS OF SPACE-TIME RANDOM SIGNALS FORMED BY TWO-DIMENSIONAL MARKOV RENEWAL PROCESS

The article outlines the characteristics of space-time signals generated by means of a two-dimensional Markov renewal process. Special features of this process are stationarity, 'memorylessness' (Markov property) and simplicity which are fixed by homogenous, one-step Markov chains. The study was carried out by means of the software simulation complex 'CSsF' (computer simulation complex of stochastic fields). The selection of the state space based on the grid structure (morphology of edge structure) as well as the selection of final probabilities of forming elements occurrence are determined manually by the operator in advance.

UDC 621.396.969.1

**Velikanova E.P., Voroshilin E.P., Rogozhnikov E.V.
INCREASING THE ACCURACY WHEN ESTIMATING
THE COORDINATES OF MOBILE SYSTEM SUBSCRIBER
CONTROLLING THE LEVEL OF SIGNAL DEPRESSION
IN DISTRIBUTION CHANNEL**

Using the direct statistic simulation method the authors have studied the influence of uncertainty at assignment of observation noise covariance on the error of subscriber coordinates estimation formed at the output of Kalman filtering algorithm. The authors have computed the gain in increasing accuracy of coordinate estimation which may be obtained when controlling the change of signal-to-noise ratio for communication system.

UDC 004.932

**Nemirovsky V.B., Stoyanov A.K.
IMAGE SEGMENTATION BY RECURRENT
NEURAL NETWORK**

The article considers the possibility of using one-dimensional point map for image segmentation. In view of segmentation the authors discuss the issues of computing the parameters of neural recurrent network implementing such mapping. The article introduces the results of the experiments in multistep segmentation.

UDC 004.652.8:004.825

**Mitsel A.A., Sibilev V.D., Krasikov I.A.
DIAGNOSTICS OF DATABASE MODELS
ON THE BASIS OF PRODUCTION SYSTEM**

The article introduces the logic structure and mechanism of operation of the designed automated system for testing database model. The authors enter the knowledge base formalization in production system of artificial intelligence applied in syntactic analysis of database models. The article considers the examples of logical inference based on knowledge given in formalized knowledge base of artificial intelligence production system.

UDC 004.421

**Khrul S.A., Sonkin D.M.
THE ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING
THE NAVIGATION INFORMATION STREAM BASED
ON DIAGNOSTIC FILTERING TECHNIQUE**

The article considers the task of processing the navigation data stream for increasing validity and decreasing the volume of master data. Considering the analysis of the existing approaches the authors have developed the adaptive algorithm for sifting the redundant and noisy data operating in real time mode and based on diagnostic filter-

ing. The algorithm allows decreasing the navigation data stream as well as reducing considerably the load to the data transmission channel. The article introduces the example of practical application within the current transport monitoring system.

UDC 004.75

**Tarakanov E.V.
DATA TRANSMISSION MODELING IN WIRELESS SENSOR
NETWORKS**

The paper introduces an overview of wireless sensor networks and the description of the TOSSIM simulation environment and the example of simulating the protocol of data packet transfer in wireless sensor network.

UDC 378.662.007

**Kochegurov V.A., Berestneva O.G., Shevelev G.E.
THE DEPARTMENT OF APPLIED MATHEMATICS IS 40**

The article is devoted to the 40th anniversary of the applied mathematics department foundation. The paper introduces the history of the department development, its profiles and scientific schools.

УДК 66.012-52

**Goryunov A.G., Kurochkin V.A.,
Chuchalin I.P., Moskaev V.A.
THE DEVELOPMENT OF AUTOMATED SYSTEM FOR
CONTROLLING SILICON RODS RESISTIVE HEATING
BY ALTERNATING CURRENT**

The authors consider the problem of forming the inner temperature gradient in silicon rods at vapor-phase chemical deposition of polycrystalline silicon in Siemens-reactor. The article introduces the method and the device with the automated control system which allow decreasing considerably the temperature gradient. The most efficient structure of power section in the AC power supply has been developed and stability of the source control system was checked using the mathematical model.

УДК 62-51

**Mikhalevich S.S., Baydali S.A., Chuchalin I.P., Moskaev V.A.
THE ALGORITHM FOR MODELING
THE CONTROL SYSTEM OF THE STATE SPACE METHOD**

The article introduces the mathematical description of the state space method for linear dynamic systems which appear as random combinations of dynamic elements. The authors have described the procedure for compiling the system description in state space. The algorithm for selecting the order of elements calculation in a control system is given.

Сведения об авторах

- Абанькин Анатолий Сергеевич**, 1990 г.р., студент кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-12-95. E-mail: abanas@tpu.ru. Область научных интересов: физика плазмы, математическое моделирование технологических процессов.
- Аврамчук Валерий Степанович**, 1978 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 41-89-07. E-mail: avs@tpu.ru. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, спектральный анализ, обнаружение утечек.
- Александрова Татьяна Викторовна**, 1976 г.р. ассистент кафедры интегрированных компьютерных систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-18-37. E-mail: tata09@mail.ru. Область научных интересов: автоматизация технологических процессов и производств, диагностика технологического оборудования.
- Алексеев Александр Александрович**, 1988 г.р., аспирант кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-06-10. E-mail: frt@tpu.ru. Область научных интересов: разработка информационных систем, параллельное программирование.
- Афонин Сергей Васильевич**, 1959 г.р., д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. лаборатории распространения оптических сигналов Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск. Р.т. 49-10-81. E-mail: aфонin@iao.ru. Область научных интересов: радиационные процессы в атмосфере; системы и технологии математического моделирования для естественных наук.
- Бажанов Александр Геральдович**, 1985 г.р., программист, аспирант кафедры «Техническая кибернетика» Института информационных технологий и управляющих систем БГТУ им. В.Г. Шухова. Р.т. 8-(472-2) 30-99-46. E-mail: all_exe@mail.ru. Область научных интересов: цементное производство, автоматизированные системы управления, интеллектуальные методы управления, программно-аппаратные средства автоматизации, нечеткие системы.
- Байдали Сергей Анатольевич**, 1984 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-70-96. E-mail: basa@tpu.ru. Область научных интересов: компьютерное моделирование, автоматизация технологических процессов.
- Баласаниян Сейран Шамирович**, 1945 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления и информатики, директор Капанского филиала Государственного инженерного университета Армении, г. Капан, Армения. Р.т. 8-(374-91)-43-85-90. E-mail: sunicom@syunik.am. Область научных интересов: анализ эффективности функционирования сложных технических систем с учетом надежности их элементов методом компьютерного моделирования.
- Банюкин Павел Иванович**, 1988 г.р., ассистент кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 41-89-07. E-mail: pavel805@gmail.com. Область научных интересов: семантический веб, информационные системы.
- Белов Виктор Матвеевич**, 1960 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры «Безопасность и управление в телекоммуникациях» факультета автоматической электрической связи Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск. Р.т. 8-(383)-269-8-296. E-mail: vmbelov@mail.ru. Область научных интересов: математическое моделирование, численные методы, обработка данных, комплексы программ.
- Белов Владимир Васильевич**, 1948 г.р., д-р физ.-мат. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, зав. лабораторией распространения оптических сигналов Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск. Р.т. 49-22-37. E-mail: belov@iao.ru. Область научных интересов: теория формирования изображений в рассеивающих средах, статистическое моделирование, теория переноса излучения.
- Берестнева Ольга Григорьевна**, д-р техн. наук, профессор кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ Р.т. 42-61-00. E-mail: ogb6@yandex.ru. Область научных интересов: математическое моделирование, интеллектуальные системы, здравоохранение, психология.
- Бессмертный Игорь Александрович**, 1954 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Р.т. 8-(812)-233-24-76. E-mail: igor_bessmertny@hotmail.com. Область научных интересов: интеллектуальные системы, логическое программирование, онтологический инжиниринг.
- Бойченко Иван Валентинович**, 1974 г.р., канд. тех. наук, доцент, докторант кафедры автоматизированных систем управления факультета систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 70-15-36. E-mail: biv@asu.tusur.ru. Область научных интересов: распределенные вычислительные системы, высокопроизводительные вычислительные системы, компьютерные сети, объектно-ориентированное программирование, формальные методы разработки программного обеспечения.
- Боловин Евгений Владимирович**, 1991 г.р., магистрант кафедры «Электропривод и электрооборудование» Энергетического института ТПУ. Р.т. 56-32-55. E-mail: djon-garator@mail.ru. Область научных интересов: динамическая идентификация параметров электрических приводов.
- Бортников Евгений Валерьевич**, 1989 г.р., аспирант кафедры автоматизированных систем управления факультета систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 70-15-36. E-mail: bortnikov@asu.tusur.ru. Область научных интересов: распределенные вычислительные системы, верификация протоколов компьютерных сетей, формальные методы разработки программного обеспечения.
- Буй Тхи Тху Чанг**, 1984 г.р., аспирант кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. Р.т. 41-89-12. E-mail: trangbt.084@gmail.com. Область научных интересов: обработка изображений, вейвлет-преобразование, искусственные нейронные сети, распознавание образов.

- Великанова Елена Павловна**, 1984 г.р., канд. техн. наук, доцт кафедры радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 41-33-98. E-mail: raliens@mail.ru. Область научных интересов: вторичная обработка радиолокационной информации, алгоритмы сопровождения траекторий подвижных целей, адаптивная фильтрация.
- Вичугов Владимир Николаевич**, 1982 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 41-89-07. E-mail: vlad@aics.ru. Область научных интересов: информационные системы, нейросетевые системы автоматического управления
- Волков Юрий Викторович**, 1978 г.р., канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории биоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Института неразрушающего контроля ТПУ. Р.т. 56-36-98. E-mail: yu-volkov@tpu.ru. Область научных интересов: анализ сигналов, построение математических моделей и численных алгоритмов анализа кольцевых структур биоиндикаторов.
- Воронин Александр Васильевич**, 1947 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры интегрированных компьютерных систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-18-37. E-mail: voroninav@tpu.ru. Область научных интересов: теория автоматического управления, моделирование систем, исследование систем управления автономными объектами.
- Ворошилин Евгений Павлович**, 1981 г.р., канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 41-33-98. E-mail: ver@tor.tusur.ru. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов для систем широкополосного беспроводного доступа. Алгоритмы функционирования многопозиционных систем радиомониторинга наземного и космического базирования.
- Гаврилов Константин Сергеевич**, 1989 г.р., магистр кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-13-53. E-mail: gavrilovks@gmail.com. Область научных интересов: гидродинамические исследования скважин месторождений углеводородов, идентификация процессов и систем.
- Гайворонский Сергей Анатольевич**, 1961 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-05-88. E-mail: saga@tpu.ru. Область научных интересов: робастный анализ и синтез систем автоматического управления.
- Гергет Ольга Михайловна**, канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-61-00. E-mail: Olgagerget@mail.ru. Область научных интересов: интеллектуальные системы, математические методы, распознавание образов, здравоохранение.
- Глазырин Александр Савельевич**, 1978 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института ТПУ. Р.т. 56-32-55. E-mail: asglazyrin@tpu.ru. Область научных интересов: методы и алгоритмы динамической идентификации и управления состоянием электрических приводов.
- Голенков Валерий Валерьевич**, 1990 г.р., студент кафедры автоматизированных систем управления факультета систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 70-15-36. E-mail: valery.golenkov@gmail.com. Область научных интересов: параллельное программирование, высокопроизводительные вычислительные системы.
- Гребенщиков Сергей Александрович**, 1986 г.р., аспирант кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики ТПУ, ведущий инженер бюро ГИП ООО «НК «Роснефть» – НТЦ». Р.т. 8-(861)-26-26-428. E-mail: kmno4@tpu.ru. Область научных интересов: системы поддержки принятия решений в управлении нефтегазовым предприятием.
- Горюнов Алексей Германович**, 1979 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-70-96. E-mail: alex1479@tpu.ru. Область научных интересов: микропроцессорная техника и ее применение в АСУ ТП, силовая электроника, электроприводы, автоматизация технологических процессов.
- Григорьев Дмитрий Сергеевич**, 1991 г.р., студент кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-16-09. E-mail: _tryGX@sibmail.com. Область научных интересов: искусственный интеллект, нейронные сети, распознавание образов, обработка сигналов и изображений, вейвлет-анализ.
- Громаков Евгений Иванович**, 1943 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры интегрированных компьютерных систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-18-37. E-mail: gromakov@tpu.ru. Область научных интересов: автоматизация технологических процессов и производств, моделирование и реинжиниринг бизнес-процессов.
- Дубинин Дмитрий Владимирович**, 1966 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектроники и защиты информации Томского университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 53-30-77. E-mail: dima@info.tusur.ru. Область научных интересов: радиолокация, радионавигация, математическое моделирование, моделирование и оптимизация сложных систем, обнаружение объектов и обработка сигналов.
- Езангина Татьяна Александровна**, 1987 г.р., магистрант кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-05-88. E-mail: eza-tanya@yandex.ru. Область научных интересов: робастный анализ и синтез систем автоматического управления.
- Калайда Владимир Тимофеевич**, 1949 г.р., д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования радиотехнического факультета Томского государственного университета. Р.т. 49-22-42. E-mail: kvт@iao.ru. Область научных интересов: математическое моделирование, численные методы, обработка данных, комплексы программ.
- Кизим Алексей Владимирович**, 1975 г.р., канд. техн. наук, докторант кафедры систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград. Р.т.8-(8442)-23-81-00. E-mail: kizim@mail.ru. Область научных интересов: автоматизация производственных процессов, автоматизация проектирования, программно-информационная поддержка технического обслуживания и ремонта оборудования, интеллектуальные системы, системный анализ, управление в социальных и экономических системах.
- Кичильдинов Вильям Сабиржанович**, 1981 г.р., капитан полиции, оперуполномоченный оперативно-сысского отдела УМВД России по г. Томску. Р.т. 52-20-87. E-mail: will2911@mail.ru. Область научных интересов: математи-

- ческое моделирование, метеорология, численные методы, обработка данных, комплексы программ.
- Кобагоров Владимир Петрович**, 1949 г.р., канд. техн. наук, зав. научно-учебной лабораторией «Виртуальный промысел» Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-06-10. E-mail: kobaagorov@tpu.ru. Область научных интересов: системы поддержки принятия решений при планировании геолого-технических мероприятий.
- Кочегуров Александр Иванович**, 1954 г.р., канд. техн. наук, доцент, зам. директора Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-04-63. E-mail: kai@cc.tpu.edu.ru. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов и изображений волновых полей.
- Кочегуров Владимир Александрович**, 1931 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-61-00. E-mail: kva06@rambler.ru. Область научных интересов: моделирование в электрофизике и медицине.
- Кочегуров Владимир Александрович**, 1931 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-61-00. E-mail: am@am.tpu.ru. Область научных интересов: системный анализ, теория управления, математическое моделирование, здравоохранение.
- Кравец Алла Григорьевна**, 1971 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград. Р.т. 8-(8442)-24-81-00. E-mail: agk@gde.ru. Область научных интересов: управление в социальных и экономических системах, интеллектуальные системы, мульти-агентные технологии, прогнозирование, системный анализ.
- Кравец Андрей Дмитриевич**, 1991 г.р., студент кафедры систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград. Р.т. 8-(8442)-24-81-00. E-mail: kad@gde.ru. Область научных интересов: интеллектуальные системы, мультиагентные технологии, технологии SAP.
- Красиков Иван Александрович**, 1986 г.р., аспирант, программист кафедры автоматизированных систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 70-15-36. E-mail: Krasikov86@sibmail.com. Область научных интересов: базы данных.
- Кудинов Антон Викторович**, 1975 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники, зав. лабораторией геоинформационных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-17-77 (доп. 2228). E-mail: KudinovAV@tpu.ru. Область научных интересов: разработка и научное обоснование MES для нефтегазовой отрасли, геоинформационные системы и технологии, интеллектуальный анализ производственных данных.
- Кузьменко Елена Анатольевна**, 1958 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-96-22. E-mail: kea@tpu.ru. Область научных интересов: моделирование и расчет процессов подготовки нефти, переработки нефти.
- Кулбаев Сабырбек Саадатбекович**, 1985 г.р., аспирант кафедры автоматизированных систем управления факультета систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 70-15-36. E-mail: kulbaev@asu.tusur.ru. Область научных интересов: фрактальное сжатие цифровых изображений, параллельное программирование, высокопроизводительные вычислительные системы.
- Курочкин Владимир Александрович**, 1988 г.р. аспирант кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-70-96. E-mail: alex79@tpu.ru. Область научных интересов: микропроцессорная техника, силовая электроника.
- Кучуганов Александр Валерьевич**, 1974 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова. Р.т. 8-(341-2)-58-89-10. E-mail: Aleks_KAV@udm.ru. Область научных интересов: искусственный интеллект, распознавание образов, бионика.
- Лаевский Виктор Евгеньевич (V. Geringer)**, 1969 г.р., канд. техн. наук, зав. лаб. «Automotive Electronics», «Energy and Environmental Engineering», Baden-Württemberg Cooperative State University, Friedrichshafen, Germany. Р.т. 49-(7-541)-2-077-515. E-mail: geringer@DHBW-Ravensburg.de. Область научных интересов: математическое моделирование, моделирование и оптимизация сложных систем, алгоритмы обработки изображений и их оптимизация, распознавание образов, обнаружение объектов.
- Лещик Юлия Вадимовна**, аспирант кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 51-75-30. E-mail: catlen@ya.ru. Область научных интересов: алгоритмы обработки данных, нечеткая логика.
- Ли Алексей Михайлович**, 1986 г.р., аспирант кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-12-95. E-mail: alee@tpu.ru. Область научных интересов: системы управления, математическое и программное обеспечение системы управления плазмой токамака, обработка измерительной информации.
- Лиепиньш Андрей Вилнисович**, 1974 г.р., канд. техн. наук, директор по развитию «Томскнефтепроект». Р.т. 78-36-01 (доп. 277). E-mail: LiepinyshAV@tomsknefteprojekt.ru. Область научных интересов: методы эффективного управления проектной деятельностью, реинжиниринг бизнес-процессов.
- Магергут Валерий Залманович**, 1941 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры «Техническая кибернетика» Института ИТУС БГТУ им. В.Г. Шухова. Р.т. 8-(472-2) 30-99-46. E-mail: valerymag@nm.ru. Область научных интересов: автоматизация, адаптивные позиционные системы, высокоточные системы, генетические алгоритмы, компьютерные тренажеры, мехатроника, модели и моделирование, нечеткие системы, оптимизация, производство, распределенные системы, робототехнические системы, технологии логических систем, сети Петри.
- Мальшенко Александр Максимович**, 1937 г.р., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой интегрированных компьютерных систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-18-37. E-mail: tam@tpu.ru. Область научных интересов: теория автоматического управления, управление подвижными объектами, моделирование и реинжиниринг бизнес-процессов.
- Массель Людмила Васильевна**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск. Р.т. 8-(395-2)-42-96-19. E-mail: massel@isem.sei.irk.ru. Область научных интересов: системы компьютерной

- поддержки научных исследований, информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений, проблемно-ориентированные системы, основанные на веб-технологиях, онтологическое, когнитивное и событийное моделирование.
- Медведко Олег Викторович**, 1980 г.р., аспирант Новосибирского государственного университета, директор по экономике и финансам ХК «НЭВЗ-Союз», г. Новосибирск. Р.т. 8-(382-2)-28-92-09. E-mail: o.medvedko@ngs.ru. Область научных интересов: финансовая математика.
- Мицель Артур Александрович**, 1947 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем Юргинского технологического института ТПУ, профессор кафедры автоматизированных систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 70-15-36. E-mail: MAA@asu.tusur.ru. Область научных интересов: математические и инструментальные методы в экономике, разработка мультимедийных учебников для высшей школы.
- Михалевич Сергей Сергеевич**, 1988 г.р., инженер-проектировщик кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-70-96. E-mail: mse@tpu.ru. Область научных интересов: математическое моделирование и автоматизация процессов и аппаратов.
- Моисеева Светлана Петровна**, 1971 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры теории вероятности и математической статистики факультета прикладной математики и кибернетики Томского государственного университета. Р.т. 52-95-99. E-mail: smoiseeva@mail.ru. Область научных интересов: теория массового обслуживания, теория случайных процессов, экономико-математическое моделирование.
- Мойзес Ольга Ефимовна**, 1950 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-96-22. E-mail: moe@tpu.ru. Область научных интересов: моделирование и расчет процессов подготовки нефти, переработки нефти.
- Монахов Олег Геннадьевич**, 1951 г.р., канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СОРАН, г. Новосибирск. Р.т. 8-(383)-301-14-89. E-mail: monakhov@gav.ssc.ru. Область научных интересов: параллельные алгоритмы, вычислительные системы, теория графов, эволюционные вычисления, финансовая математика, искусственный интеллект, теория оптимизации.
- Москалев Владилен Александрович**, 1927 г.р., д-р техн. наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор-консультант кафедры теоретической и экспериментальной физики Института физики высоких технологий ТПУ. Р.т. 56-41-58. E-mail: vladm@tpu.ru. Область научных интересов: ускорительная техника, автоматизация технологических процессов.
- Назаров Анатолий Андреевич**, 1947 г.р., д-р техн. наук, зав. кафедрой теории вероятностей и математической статистики Томского государственного университета. Р.т. 52-95-99. E-mail: anazarovfpmk@tsu.ru. Область научных интересов: математическое моделирование, телекоммуникационные сети, прикладной вероятностный анализ.
- Немеров Александр Александрович**, 1987 г.р. аспирант кафедры автоматизированных систем управления факультета систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 70-15-36. E-mail: nemerov@asu.tusur.ru. Область научных интересов: распределенные вычислительные системы, объектно-ориентированное программирование, формальные методы разработки программного обеспечения.
- Немировский Виктор Борисович**, 1945 г.р., канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-07-27. E-mail: nemir-vb@ad.cctpu.edu.ru. Область научных интересов: нейронные сети, искусственный интеллект, обработка изображений.
- Нугуманова Алия Багдатовна**, Phd-докторант кафедры информационных систем Восточно-Казахстанского государственного технического университета им Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск. Р.т. 8-(723-2)-54-04-43. E-mail: yalisha@ya.ru. Область научных интересов: информационный поиск, интеллектуальный анализ, онтологический инжиниринг.
- Область научных интересов: алгоритмы, методы и средства частотно-временного анализа диагностических сигналов состояния электрооборудования.
- Павлов Вадим Михайлович**, 1965 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-12-95. E-mail: pavlov@tpu.ru. Область научных интересов: автоматизация научных исследований на экспериментальных физических установках, системы управления, регистрации и сбора данных, обработка измерительной информации.
- Пеккер Яков Семенович**, 1939 г.р., канд. техн. наук, Заведующий кафедрой медицинской и биологической кибернетики ГБОУ ВПО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России, профессор кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета.г. Томск. Р.т. 42-09-52. Email: pekker@ssmu.ru. Область научных интересов: биотехнические системы и информационные технологии, оценка состояния биосистем.
- Погребной Александр Владимирович**, 1973 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-05-09. E-mail: Pogrebnoy@tpu.ru. Область научных интересов: автоматизированное проектирование распределенных систем реального времени.
- Погребной Владимир Кириллович**, 1942 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-07-27. E-mail: vkr@tpu.ru. Область научных интересов: дискретная математика, математическое программирование, моделирование систем, автоматизированное проектирование распределенных систем реального времени.
- Погребной Владимир Кириллович**, 1942 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-07-27. E-mail: vkr@tpu.ru. Область научных интересов: дискретная математика, математическое программирование, моделирование систем, автоматизированное проектирование распределенных систем реального времени.
- Полищук Владимир Иосифович**, 1966 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры электрических сетей и электротехники Энергетического института ТПУ. Р.т. 56-37-63. E-mail: polishukvi@tpu.ru. Область научных интересов: развитие теории построения релейной защиты и диагностики синхронных машин.

- Разин Владимир Викторович**, 1986 г.р., аспирант кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-14-85. E-mail: moonbreeze@sibmail.com. Область научных интересов: web-онтологии, стек технологий Semantic Web, ситуационное управление.
- Рогожников Евгений Васильевич**, 1989 г.р., магистр техники и технологии по направлению радиотехника, техник кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 41-33-98. E-mail: udzhon@sibmail.com. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов для систем широкополосного беспроводного доступа.
- Рожкова Светлана Владимировна**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры высшей математики Физико-технического института Томского политехнического университета. Р.т. 56-37-29. E-mail: rozhkova@tpu.ru. Область научных интересов: фильтрация, интерполяция, экстраполяция, распознавание стохастических процессов, передача стохастических сигналов по непрерывно-дискретным каналам с памятью; обнаружение аномальных помех; математическая теория финансового анализа.
- Савельев Алексей Олегович**, 1987 г.р., аспирант кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-06-10. E-mail: sava@tpu.ru. Область научных интересов: анализ данных, модели и методы построения систем поддержки принятия решений.
- Савельев Алексей Олегович**, 1987 г.р., аспирант кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-07-60. E-mail: sava@cc.tpu.edu.ru. Область научных интересов: анализ данных, модели и методы построения систем поддержки принятия решений.
- Саньков Антон Андреевич**, 1990 г.р., студент кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-12-95. E-mail: sankov@sibmail.com. Область научных интересов: разработка алгоритмов и программного обеспечения обработки сигналов с датчиков электромагнитной диагностики токамака.
- Сергеев Виктор Леонидович**, 1947 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-13-53. E-mail: SergeevVL@ign.tpu.ru. Область научных интересов: мониторинг разработки месторождений углеводородов, системный анализ, идентификация и управление.
- Сибилев Валерий Дмитриевич**, 1944 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 70-15-36. E-mail: SYB@asu.tusur.ru. Область научных интересов: базы данных.
- Силич Виктор Алексеевич**, 1946 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-07-60. E-mail: vas@tpu.ru. Область научных интересов: модели и методы системного анализа, системы поддержки принятия решений.
- Синёва Клара Яковлевна**, ст. преподаватель кафедры электроники и автоматики физических установок Физико-технического института ТПУ. Р.т. 41-91-45. E-mail: klara-yakovlevna@mail.ru. Область научных интересов: математическое моделирование, численные методы, обработка данных, комплексы программ, метеорология, статистические методы исследований, кибернетика, автоматика, информатика.
- Синякова Ирина Анатольевна**, 1987 г.р., аспирант кафедры теории вероятностей и математической статистики факультета прикладной математики и кибернетики Томского государственного университета. Р.т. 52-95-99. E-mail: Irinka_asf@mail.ru. Область научных интересов: теория массового обслуживания, теория случайных процессов.
- Соломатов Дмитрий Владимирович**, 1983 г.р., канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории распространения оптических сигналов Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск. Р.т. 49-10-81. E-mail: solomатов@iao.ru. Область научных интересов: алгоритмы и программные средства обработки спутниковых данных.
- Сонькин Дмитрий Михайлович**, 1986 г.р., канд. техн. наук, ассистент кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 51-75-33. E-mail: sonkind@tpu.ru. Область научных интересов: информационно-телекоммуникационные системы для передачи данных с труднодоступных и подвижных объектов.
- Сонькин Михаил Аркадьевич**, 1954 г.р., д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-00-01. E-mail: sonkin@tpu.ru. Область научных интересов: системы передачи данных с труднодоступных и подвижных объектов, построение территориально-распределённых систем.
- Спицын Владимир Григорьевич**, 1948 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. Р.т. 41-89-12. E-mail: spvg@tpu.ru. Область научных интересов: распространение волн в трехмерно-неоднородных дискретных случайных средах; воздействие возмущений ионосферной плазмы, создаваемых космическим аппаратом, на распространение электромагнитных волн; взаимодействие волн в плазме; нейронные сети; генетические алгоритмы; обработка и анализ изображений.
- Стоянов Александр Кириллович**, 1946 г.р., канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-07-27. E-mail: stoj-ak@ad.cctpu.edu.ru. Область научных интересов: нейронные сети, искусственный интеллект, извлечение знаний из данных.
- Тараканов Евгений Владимирович**, 1982 г.р., ассистент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ. Р.т. 41-75-27. E-mail: tark@tpu.ru. Область научных интересов: беспроводные сенсорные сети, теория голосования.
- Тартаковский Валерий Абрамович**, 1943 г.р., д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией биоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск. Р.т. 49-26-53. E-mail: tv@imces.ru. Область научных интересов: математическое моделирование, анализ сигналов.
- Ткачук Роман Юрьевич**, 1990 г.р., инженер ОАО «НПО «Карат», г. Санкт-Петербург. Р.т. 8-(812)-406-82-90 (доб. 3209). E-mail: Tkachuk.R.U@npo-karat.ru. Область научных интересов: интеллектуальный электропривод, идентификация параметров и переменных состояния объектов управления, отказоустойчивое управление.
- Тузовский Анатолий Федорович**, 1952 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-14-85. E-mail: tuzovskya@mail.ru. Область научных интересов: семантические технологии, онтологии, Интернет технологии, технологии разработки программ.

- Утанан Сергей Александрович**, 1990 г.р., магистрант кафедры электрических сетей и электротехники Энергетического института ТПУ. Р.т. 56-37-63. E-mail: sougus@tpu.ru.
- Ушева Наталья Викторовна**, 1948 г.р., канд. хим. наук, доцент кафедры химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-96-22. E-mail: usheva@tpu.ru. Область научных интересов: моделирование и расчет процессов подготовки нефти, переработки нефти.
- Фан Нгок Хоанг**, 1983 г.р., аспирант кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. Р.т. 41-89-12. E-mail: hoangpn285@gmail.com. Область научных интересов: обработка изображений, искусственные нейронные сети, распознавание отпечатков пальца.
- Фокин Василий Александрович**, 1956 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры медицинской и биологической кибернетики ГБОУ ВПО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Томск. Р.т. 42-09-52. Email: fokin@ssmu.ru. Область научных интересов: многомерный анализ биомедицинских данных, математическое моделирование в медицине и биологии, оценка состояния биосистем.
- Фофанов Олег Борисович**, 1949 г.р., канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой оптимизации систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-07-60. E-mail: ofofan@tpu.ru. Область научных интересов: системы поддержки принятия решений при планировании геолого-технических мероприятий.
- Хлебникова Елена Сергеевна**, магистрант кафедры химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-96-22. E-mail: elena.khle@gmail.com.ru. Область научных интересов: исследование и расчет процессов промышленной подготовки нефти и газа.
- Хоанг Ван Куэт**, 1985 г.р., аспирант кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42 14-85. E-mail: student8050@sibmail.com. Область научных интересов: исследование методов поддержки работы с семантическими базами знаний и их эффективности.
- Хруль Сергей Анатольевич**, 1987 г.р., аспирант кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-05-09. E-mail: siberianodis@gmail.com. Область научных интересов: статистический анализ данных, системы мониторинга мобильных объектов, прикладное программирование.
- Чучалин Иван Петрович**, 1925 г.р., д-р техн. наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор-консультант кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ. Р.т. 41-89-69. E-mail: ime@tpu.ru. Область научных интересов: электроника и микроэлектроника, электротехника, автоматизация технологических процессов.
- Шевелев Геннадий Ефимович**, 1946 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-61 ogb@rambler.ru. E-mail: am@tpu.ru. Область научных интересов: моделирование и информационные технологии.
- Щелканова Татьяна Алексеевна**, магистрант кафедры интегрированных компьютерных систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-18-37. E-mail: Zene4ka@sibmail.com. Область научных интересов: теория автоматического управления, исследование систем управления для неустойчивых и нейтральных объектов.
- Ямпольский Владимир Захарович**, 1938 г.р., д-р техн. наук, профессор-консультант кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики Томского политехнического университета. Р.т. 42-07-60. E-mail: yvz@tpu.ru. Область научных интересов: системный анализ, математическое моделирование.
- Яценко Михаил Анатольевич**, 1972 г.р., ведущий инженер ООО «Инком», г. Томск. Р.т. 42-07-60. E-mail: yvz@tpu.ru. Область научных интересов: моделирование вычислительных систем.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи до 8 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал **без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов**, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: **Рис. 1. Название; Таблица. Название.** Кавычки вида «...». Интервалы – 1,2...1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в MathType, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ($U_{пр.}$, Φ_i , но Al_2O_3 , $\cos\alpha_i$, \max , \lg , «BASF»). Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5-2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7].

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ

И.И. Иванов, П.П. Петров*

Томский политехнический университет

*ОАО «Центр», г. Москва

E-mail: ivanov@tpu.ru

Показана возможность расчета ... Установлено, что ... Сделан вывод о том, что ... (Аннотация, 10 кегль).

Ключевые слова (ниже ключевые слова на английском языке):

Усилительный каскад, регулировка тока.

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фамилия И.О. Название книги. – М.: Издательство, 2012. – 123 с.
2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. – М.: Издательство, 2012. – 123 с.
3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2012. – Т. 316. – № 4. – С. 71–77.
4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 19 с.
5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.10; опубл. 10.10.12, Бюл. № 4. – 3 с.
6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2012. – Т. 1. – С. 226–228.
7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2012. URL: <http://www.tpu.ru/html/izvestia.htm> (дата обращения: 25.09.2012).

Поступила 25.04.2012 г.

Сведения об авторах:

Иванов Иван Иванович, 1975 г.р., канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры автоматизации и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 22-22-22. E-mail: ivanov@tpu.ru. Область научных интересов: анализ...

Редактирование и корректура *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык *С.В. Жаркова*

Подписано к печати 27.12.2012. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 30,48. Уч.-изд. л. 27,56.
Заказ 1534-12. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, izv@tpu.ru