

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 323, № 5, 2013

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)  
Дамамми Ж., PhD (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 (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 (Исландия)  
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 (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

Издаётся с 1903 г.

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013

# 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.,  
vice-rector of TPU for Research and Innovation (Tomsk)  
Aleksenko S.V., D. Phys. and Math. 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., D. Phys. and Math. Sc., member of RAS (Moscow)  
Damamm G., PhD (France)  
Dmitriev A.Yu., Candidate of Science (Tomsk)  
Dolmatov O.Yu., Candidate of Science (Tomsk)  
Ershov Yu.L., D. Phys. and Math. Sc., member of RAS (Novosibirsk)  
Zamyatin A.V., Candidate of Science (Tomsk)  
Klimenov V.A., D.E. (Tomsk)  
Kontorovich A.E., D. Geol. and Mineral. Sc., member of RAS (Novosibirsk)  
Kröning M., PhD (Germany)  
Letnikov F.A., D. Geol. and Mineral. Sc., member of RAS (Irkutsk)  
Mesyats G.A., D. Phys. and Math. Sc., member of RAS (Moscow)  
Mikhailenko B.G., D. Phys. and Math. Sc.,  
member of RAS (Novosibirsk)  
Nakoryakov V.E., D. E., member of RAS (Novosibirsk)  
Panin V.E., D. Phys. and Math. Sc., member of RAS (Tomsk)  
Sigov A.S., D. Phys. and Math. Sc., member of RAS (Moscow)  
Sigfusson T.I., PhD (Iceland)  
Turnaev V.I., PhD (Tomsk)  
Fillipov G.A., D.E., member of RAS (Moscow)  
Chaikovskiy D.V., Candidate of Science (Tomsk)  
Shen Zhaoli, PhD (China)  
Yakovlev A.N., Candidate of Science (Tomsk)

## Editorial Team:

Pestryakov A.N. (Chairman, Editor in Chief), D. Chem.  
Korobeinikov A.F. (Deputy Editor in Chief), D. Geol. and Mineral. 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., D. Phys. and Math. Sc.  
Zavorin A.S., D.E.  
Ivanchina E.D., D.E.  
Ilyin A.P., D. Phys. and Math. Sc.  
Kornienko A.A., Ph. D.  
Lavrinovich V.A., D.E.  
Pogrebnoy V.K., D.E.  
Savichev O.G., D. Geog. Sc.  
Tuzovsky A.F., D.E.  
Shamanin I.V., D. Phys. and Math. 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/](http://portal.tpu.ru/izvestiya/);  
ООО «Научная электронная библиотека»:  
[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [www.e-library.ru](http://www.e-library.ru),  
а также поисковой системы [scholar.google.com](http://scholar.google.com)

Импакт-фактор РИНЦ 2011 г. 0,210

© Tomsk Polytechnic University, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА</b>	
Управление опционными ресурсами: полное использование ресурса в производственном цикле Китаева А.В., Степанова Н.В., Терпугов А.Ф.	5
Параллельные вычислительные методы определения параметрических обобщенных обратных матриц Симонян С.О.	10
Исследование RQ-системы $M G 1$ с вытеснением в условии большой задержки Назаров А.А., Черникова Я.Е.	16
Адаптивная интерпретация кривой восстановления давления горизонтальных скважин с диагностикой потоков Романова Е.В., Сергеев В.Л.	20
Анализ энергетической эффективности территорий на основе иерархии гибридных когнитивных карт Силич М.П., Силич В.А., Аксенов С.В.	26
<b>УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ</b>	
Моделирование сдвига функций во временной области методом изображающих векторов Шалаев Ю.Н.	33
Индексы каузальности динамических систем и их использование в схематическом проектировании и при оценке функциональной воспроизводимости систем автоматического управления Мальшченко А.М.	37
Использование сигналов современных телекоммуникационных систем в пассивных радиолокационных системах Рогожников Е.В., Ушарова Д.Н., Убайчин А.В.	44
Компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации руды с учётом надёжности измельчительного оборудования Баласанян С.Ш., Симонян С.О., Геворгян Э.М.	50
Лазерный створ визуальной навигации Слободян С.М., Цупин А.А.	58
Моделирование промышленных объектов управления с детерминированной нестационарностью Беккер В.Ф., Бильфельд Н.В., Камаев Д.С.	63
Анализ сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания Аврамчук В.С., Казьмин В.П.	69
Квалиметрия достижимости и возмущаемости линейных динамических систем Воронин А.В.	74
<b>ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ</b>	
Оптимизация составления маршрутов общественного транспорта при создании автоматизированной системы поддержки принятия решений Кочегурова Е.А., Мартынова Ю.А.	79
Выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе вейвлет-анализа магнитных потоков рассеяния Полищук В.И., Хамухин А.А.	85
Принципы разработки системы мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения на основе постоянно действующей геолого-технологической модели Силич В.А., Комагоров В.П., Савельев А.О.	94
Разработка системы оптического распознавания символов на основе совместного применения вероятностной нейронной сети и вейвлет-преобразования Хаустов П.А., Григорьев Д. С., Спицын В.Г.	101
Улучшение качества метода оптического распознавания текстов с помощью совместного применения вейвлет-преобразований, курвлет-преобразований и алгоритмов словарного поиска Григорьев Д. С., Хаустов П.А., Спицын В. Г.	107
Онтология «интеллектуальное месторождение» Ямпольский В.З., Заикин И.А.	112

## CONTENTS

<b>APPLIED MATHEMATICS</b>	
Inventory control: fully resource usage in production cycle Kitaeva A.V., Stepanova N.V., Terpugov A.F.	5
Parallel computing methods to determine parametric generalized inverse matrices Simonyan S.H.	10
Investigation of preemptive RQ-system $M G 1$ under extensive delay Nazarov A.A., Chernikova Ya.E.	16
Adaptive interpretation of pressure recovery curve of horizontal wells with diagnostic flow Romanova E.V., Sergeev V.L.	20
Analysis of energy efficiency of territories based on hybrid cognitive maps hierarchy Silich M.P., Silich V.A., Aksenov S.V.	26
<b>ENGINEERING SYSTEM CONTROL</b>	
Modeling of function shift in time domain by the depict vectors method Shalaev Yu.N.	33
Dynamic systems causality indices and their use in schematic design and in functional reproducibility assessment of automatic control systems Malyschenko A.M.	37
Application of signals of modern telecommunication systems in passive radar systems Rogozhnikov E.V., Usharova D.N., Ubaychin A.V.	44
Computer model for stochastic control of the ore flotation process considering grinding equipment reliability Balasanyan S.Sh., Simonyan S.O., Gevorgyan E.M.	50
Laser river route of visual navigation Slobodyan S.M., Tsupin A.A.	58
Simulation of industrial management facilities with deterministic nonstationary Bekker V.F., Bilfeld N.V., Kamaev D.S.	63
Analysis of vibration signals of combustion engine Avramchuk V.S., Kazmin V.P.	69
Qualimetry of reachability and response of linear dynamic systems Voronin A.V.	74
<b>INTELLIGENCE SYSTEMS</b>	
Optimization of planning the public transport routes when developing the automated decision support systems Kochegurova E.A., Martynova Yu.A.	79
The impact of turn-to-turn short circuits of synchronous generator rotor winding based on wavelet analysis of leakage flux Polishchuk V.I., Khamukhin A.A.	85
Principles of developing the system of monitoring and adaptive controlling the intelligent oil field study based on permanent geological and technological models Silich V.A., Komagorov V.P., Savelyev A.O.	94
The development of optical character recognition approach on the basis of joint application of probabilistic neural network and wavelet transform Khaustov P.A., Grigoryev D.S., Spitsyn V.G.	101
Improving the quality of optical character recognition by joint application of wavelet- and curvelet-transforms and vocabulary search algorithm Grigoryev D.S., Khaustov P.A., Spitsyn V.G.	107
The «smart field» ontology Yampolskiy V.Z., Zaikin I.A.	112

<b>Организация удалённого участия в экспериментах на установке типа Токамак</b> Мезенцев А.А., Павлов В.М., Голобоков Ю.Н., Евстифеев Д.А.	<b>117</b>	<b>Implementation of remote participation at Tokamak device experiments</b> Mezentsev A.A., Pavlov V.M., Golobokov Yu.N., Evstifeev D.A.
<b>АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ</b>		<b>SOFTWARE AND ALGORITHMIC SUPPORT</b>
<b>Исследование быстродействия модифицированного кодера JPEG на SoC ARM i.MX233 с поддержкой контроля битрейта</b> Сидоров Д.В., Осокин А.Н.	<b>124</b>	<b>Research for compressing time of modified JPEG encoder with bit rate control on arm-based SoC i.MX233</b> Sidorov D.V., Osokin A.N.
<b>Увеличение производительности программной платформы для реализации алгоритмов метода группового учета аргументов</b> Орлов А.А.	<b>129</b>	<b>Increasing the performance of the software framework for implementing the algorithms of the group method of data handling</b> Orlov A.A.
<b>Задача определения минимального числа станций для подключения терминальных точек объекта управления</b> Погребной Ал.В.	<b>140</b>	<b>Determination of minimum number of stations for connecting terminal points of control object</b> Pogrebnoy Al.V.
<b>Исследование полиномиальности метода вычисления интегрального описателя структуры графа</b> Погребной В.К., Погребной Ан.В.	<b>146</b>	<b>Polynomiality of method for computing graph structure integral descriptor</b> Pogrebnoy V.K., Pogrebnoy An.V.
<b>Полиномиальный алгоритм вычисления полного инварианта графа на основе интегрального описателя структуры</b> Погребной В.К., Погребной Ан.В.	<b>152</b>	<b>Polynomial algorithm of computing complete graph invariant on the basis of integral structure descriptor</b> Pogrebnoy V.K., Pogrebnoy An.V.
<b>Распараллеливание алгоритма выделения границ объектов на основе структурно-графического представления</b> Демин А.Ю., Дорофеев В.А.	<b>159</b>	<b>Parallelization of algorithm for detecting borders on the basis of structural and graphic presentation</b> Demin A.Yu., Dorofeev V.A.
<b>Решение прикладных задач с использованием гетерогенных вычислительных систем</b> Лощухина Т.Е., Дорофеев В.А.	<b>165</b>	<b>Solving the applied tasks using the heterogeneous computing systems</b> Loshchukhina T.E., Dorofeev V.A.
<b>Анализ структурных изменений в онтологиях на языке OWL 2</b> Заикин И.А.	<b>170</b>	<b>Analysis of structural changes in OWL2 ontologies</b> Zaikin I.A.
<b>СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ</b>		<b>SYSTEMS ENGINEERING</b>
<b>Системная инженерия и её внедрение в образовательные программы Томского политехнического университета</b> Чубик П.С., Марков Н.Г., Мирошниченко Е.А., Петровская Т.С.	<b>176</b>	<b>Systems engineering and its application to educational programs of the Tomsk Polytechnic University</b> Chubik P.S., Markov N.G., Miroshnichenko E.A., Petrovskaya T.S.
<b>НАШИ ЮБИЛЯРЫ</b>		<b>ANNIVERSARIES</b>
<b>Профессору В.З. Ямпольскому – 75 лет</b>	<b>182</b>	<b>Professor V.Z. Yampolsky is 75</b>
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</b>	<b>184</b>	<b>INFORMATION ABOUT AUTHORS</b>

УДК 519.2

## УПРАВЛЕНИЕ ОПЦИОННЫМИ РЕСУРСАМИ: ПОЛНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСА В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ЦИКЛЕ

А.В. Китаева, Н.В. Степанова, А.Ф. Терпугов\*

Томский политехнический университет

\*Томский государственный университет

E-mail: kit1157@yandex.ru

*Рассмотрена модель управления опционными ресурсами с ограниченным сроком годности, которые необходимо полностью использовать в течение производственного цикла. Спрос на ресурс в процессе производства носит случайный характер: поток запросов – пуассоновский, величины запросов – независимые одинаково распределенные случайные величины с известным средним и дисперсией. Интенсивность пуассоновского потока запросов зависит от дополнительной прибыли предприятия. В диффузионном приближении получено распределение процесса использования ресурса, найдены вероятностные характеристики: математическое ожидание, дисперсия и функция корреляции. В случае линейной зависимости интенсивности от прибыли проведена оптимизация средней дополнительной прибыли предприятия, в том числе найдено оптимальное закупочное количество ресурса.*

### Ключевые слова:

Управление запасами, управление прибылью, ограниченный срок хранения, стохастические запросы, диффузионная аппроксимация.

### Постановка задачи

Работа продолжает исследования, начатые в [1]. Рассмотрим более сложную модель: производитель управляет дополнительной прибылью на единицу использованного сырья  $c(\cdot)$  с целью регулирования потока запросов на опционное сырье так, чтобы к концу производственного цикла длительности  $T$  все сырье  $Q(\cdot)$  было использовано, т. е.  $Q(T)=0$ . Зависимость интенсивности спроса на сырье от  $c$  вполне естественна, поскольку прибыль предприятия заложена в стоимость продукта для заказчика, и снижение этой стоимости приводит к росту спроса на продукцию. Аналогичная зависимость рассматривалась, например, в [2].

Такая модель актуальна в случае практической невозможности утилизации сырья и позволяет увеличить прибыль предприятия от использования опционного ресурса.

Итак, будем считать, что поток запросов на опционное сырье является пуассоновским потоком интенсивности  $\lambda(c)$ , зависящей от  $c(t)$ ,  $Q(t)$  – количество сырья, имеющегося в наличии в момент времени  $t$ ,  $Q(0)=Q_0$  – количество закупленного к началу производственного цикла сырья.

Рассмотрим решение задачи в диффузионном приближении процесса  $Q(\cdot)$ , т. е. будем считать, что процесс удовлетворяет следующему стохастическому уравнению

$$dQ(t) = -a_1 \lambda(c) dt + \sqrt{a_2 \lambda(c)} dw(t), \quad (1)$$

где  $w(t)$  – стандартный винеровский процесс,  $a_1$  – средняя величина одного запроса на сырье,  $a_2$  – второй начальный момент одного запроса на сырье.

Диффузионная аппроксимация часто используется в моделях управления запасами и массового обслуживания и дает адекватные результаты [3–6].

Пусть управление прибылью определяется соотношением

$$a_1 \lambda(c(t)) = \kappa \frac{Q(t)}{T-t}, \quad (2)$$

где  $\kappa > 0$  – некоторый коэффициент, т. е. интенсивность использования ресурса прямо пропорциональна его текущему количеству и обратно пропорциональна времени до конца производственного цикла. Аналогичная (2) модель управления це-

ной без введения параметра  $\kappa$  рассматривалась впервые в [7].

Итак, объединяя (1) и (2), получаем, что диффузионное приближение процесса  $Q(\cdot)$  имеет вид

$$dQ(t) = -\kappa \frac{Q(t)}{T-t} dt + \sqrt{\frac{a_2}{a_1} \kappa \frac{Q(t)}{T-t}} dw(t). \quad (3)$$

Рассмотрим вероятностные характеристики процесса  $Q(\cdot)$ .

**Характеристики процесса использования опционного ресурса**

Обозначим математическое ожидание  $E\{Q(t)\} = \bar{Q}(t)$ . Усредняя выражение (3), получим

$$d\bar{Q}(t) = -\kappa \frac{\bar{Q}(t)}{T-t} dt. \quad (4)$$

Решая (4), учитывая начальное условие  $\bar{Q}(0) = Q_0$ , получаем

$$\bar{Q}(t) = Q_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^\kappa.$$

Применяя формулу Ито для квадратичного преобразования процесса  $Q(t)$  получим

$$d(Q^2) = \left[ -2Q\kappa \frac{Q}{T-t} + \frac{a_2}{a_1} \kappa \frac{Q}{T-t} \right] dt + 2Q \sqrt{\frac{a_2}{a_1} \kappa \frac{Q}{T-t}} dw(t).$$

Усредняя, получим уравнение для второго начального момента  $Q_2(t) = E\{Q^2(t)\}$

$$\frac{dQ_2}{dt} + 2\kappa \frac{Q_2}{T-t} = \frac{a_2}{a_1} \kappa \frac{\bar{Q}}{T-t}. \quad (5)$$

Обозначим через  $VAR_Q(t) = Q_2 - \bar{Q}^2$  дисперсию процесса  $Q(t)$ .

Учитывая (4), получим

$$\frac{d(\bar{Q}^2)}{dt} = 2\bar{Q} \frac{d\bar{Q}}{dt} = -2\kappa \bar{Q}^2 \frac{1}{T-t},$$

или

$$\frac{d(\bar{Q}^2)}{dt} + 2\kappa \frac{\bar{Q}^2}{T-t} = 0. \quad (6)$$

Вычитая (6) из (5), получаем уравнение для дисперсии

$$\begin{aligned} \frac{dVAR_Q}{dt} + 2\kappa \frac{VAR_Q}{T-t} &= \frac{a_2}{a_1} \kappa \frac{\bar{Q}}{T-t} = \\ &= \frac{a_2}{a_1} \kappa \frac{Q_0}{T} \left(1 - \frac{t}{T}\right)^{\kappa-1} \end{aligned} \quad (7)$$

с начальным условием  $VAR_Q(0) = 0$ .

Общее решение уравнения (7) имеет вид

$$VAR_Q(t) = C_0 (T-t)^{2\kappa} + \frac{a_2}{a_1} \frac{Q_0}{T^\kappa} (T-t)^\kappa.$$

Учитывая начальное условие, получаем

$$VAR_Q(t) = \frac{a_2}{a_1} Q_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^\kappa \left[ 1 - \left(1 - \frac{t}{T}\right)^\kappa \right].$$

Заметим, что

$$\begin{aligned} Q_2 &= D_Q(t) + \bar{Q}^2(t) = \\ &= \frac{a_2}{a_1} Q_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^\kappa \left[ 1 - \left(1 - \frac{t}{T}\right)^\kappa \right] + \bar{Q}^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^{2\kappa}. \end{aligned}$$

Обозначим через

$$R(t_1, t_2) = E\{Q(t_1)Q(t_2)\} - E\{Q(t_1)\}E\{Q(t_2)\}$$

функцию корреляции процесса  $Q(t)$ .

Пусть  $t_2 > t_1$ , тогда, умножив уравнение

$$dQ(t_2) = -\kappa \frac{Q(t_2)}{T-t_2} dt_2 + \sqrt{\frac{a_2}{a_1} \kappa \frac{Q(t_2)}{T-t_2}} dw(t_2)$$

на  $Q(t_1)$  и усредняя по реализациям, получаем уравнение для  $E\{Q(t_1)Q(t_2)\}$

$$\frac{\partial E\{Q(t_1)Q(t_2)\}}{\partial t_2} = -\kappa \frac{E\{Q(t_1)Q(t_2)\}}{T-t_2}.$$

Его общее решение имеет вид  $E\{Q(t_1)Q(t_2)\} = C(t_1)(T-t_2)^\kappa$ . Полагая  $t_2 = t_1$ , получаем

$$C(t_1) = \frac{E\{Q(t_1)^2\}}{(T-t_1)^\kappa},$$

откуда следует

$$E\{Q(t_1)Q(t_2)\} = E\{Q(t_1)^2\} \frac{(T-t_2)^\kappa}{(T-t_1)^\kappa}.$$

Так как

$$E\{Q(t_1)Q(t_2)\} = R(t_1, t_1) + \frac{Q_0^2}{T^{2\kappa}} (T-t_1)^{2\kappa},$$

то

$$\begin{aligned} R(t_1, t_2) &= VAR_Q(t_1) \frac{(T-t_2)^\kappa}{(T-t_1)^\kappa} = \\ &= \frac{a_2}{a_1} Q_0 \left[ 1 - \left(1 - \frac{t_1}{T}\right)^\kappa \right] \left(1 - \frac{t_2}{T}\right)^\kappa, \quad t_2 > t_1. \end{aligned}$$

Найдем  $p(x, t)$  – функцию плотности вероятностей процесса  $Q(t)$  в момент времени  $t$ .

Рассмотрим преобразование  $f(Q, t) = e^{-pQ}$ , параметр  $p > 0$ . Полученный процесс удовлетворяет уравнению

$$\begin{aligned} d(e^{-pQ}) &= \left( \kappa \frac{Q}{T-t} p e^{-pQ} + \frac{a_2}{2a_1} \kappa \frac{Q}{T-t} p^2 e^{-pQ} \right) dt - \\ &- p e^{-pQ} \sqrt{\frac{a_2}{a_1} \kappa \frac{Q}{T-t}} dw(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Пусть  $\Phi(p, t) = E\{e^{-pQ}\}$  – преобразование Лапласа функции  $p(x, t)$ . Тогда, усредняя (8), получим

$$(T-t) \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \kappa p \left( 1 + \frac{a_2}{2a_1} p \right) \frac{\partial \Phi}{\partial p} = 0. \quad (9)$$

Решая (9) методом характеристик, получим уравнение для характеристик  $C = \frac{p}{p+\beta}(T-t)^k$ , где  $\beta=2a_1/a_2$ . Общее решение уравнения (9) имеет вид

$$\Phi(p, t) = \varphi\left(\frac{p}{p+\beta}(T-t)^k\right),$$

где  $\varphi(\cdot)$  – произвольная функция.

Воспользуемся условием, что  $Q(0) = Q_0$  с вероятностью 1. Тогда  $p(x, 0) = \delta(x - Q_0)$ , где  $\delta(\cdot)$  – дельта-функция Дирака. Отсюда следует, что  $\Phi(p, 0) = e^{-pQ_0}$

или  $\varphi\left(\frac{p}{p+\beta}T^k\right) = e^{-pQ_0}$ . Сделав замену перемен-

ной  $\frac{p}{p+\beta}T^k = z$ , получим  $\varphi(z) = \exp\left(-\frac{\beta z Q_0}{T^k - z}\right)$ .

Таким образом,

$$\begin{aligned} \Phi(p, t) &= \varphi\left(\frac{p}{p+\beta}(T-t)^k\right) = \\ &= \exp\left(-\frac{p\beta(1-t/T)^k Q_0}{p+\beta-p(1-t/T)^k}\right), \end{aligned}$$

или, обозначив  $(1-t/T)^k = \rho$ , получим

$$\Phi(p, t) = \exp\left(-\frac{p\beta\rho Q_0}{p+\beta-p\rho}\right). \quad (10)$$

Приведем аргумент  $\exp(\cdot)$  в (10) к виду

$$A + \frac{B}{p(1-\rho) + \beta}.$$

Очевидно, что

$$A = -\lim_{p \rightarrow \infty} \left(\frac{p\beta\rho Q_0}{p(1-\rho) + \beta}\right) = \frac{\beta\rho Q_0}{1-\rho},$$

тогда

$$\begin{aligned} B &= \frac{\beta^2 \rho Q_0}{(1-\rho)} \text{ и } \Phi(p, t) = \exp\left(-\frac{\beta\rho Q_0}{1-\rho}\right) + \\ &+ \exp\left(-\frac{\beta\rho Q_0}{1-\rho}\right) \left[ \exp\left(\frac{\beta^2 \rho Q_0}{(p+\beta/(1-\rho))(1-\rho)^2}\right) - 1 \right]. \end{aligned}$$

Используя таблицы обратного преобразования

Лапласа [8. Ф. 23.65] (в нашем случае  $a = \frac{(1-\rho)^2}{\beta^2 \rho Q_0}$ ,

$b = \frac{\beta}{1-\rho}$ ), получаем

$$\begin{aligned} p(x, t) &= \exp\left(-\frac{\beta\rho Q_0}{1-\rho}\right) \times \\ &\times \left[ \delta(x) + e^{-\beta x/(1-\rho)} \sqrt{\frac{\beta^2 \rho Q_0}{(1-\rho)^2 x}} I_1\left(2\sqrt{\frac{\beta^2 \rho Q_0 x}{(1-\rho)^2}}\right) \right], \quad (11) \end{aligned}$$

где  $I_1(\cdot)$  – функция Бесселя мнимого аргумента.

Дельта-функция в (11) возникает потому, что величина запроса на опционный ресурс является случайной и, в принципе, заказчик может использовать все оставшееся сырье, что приведет к завершению производственного цикла

#### Оптимизация средней прибыли предприятия

Рассмотрим случай, когда зависимость  $\lambda(c)$  может быть линеаризована

$$\lambda(c) = \lambda_0 - \lambda_1 \frac{c - c_0}{c_0}. \quad (12)$$

Здесь величина  $c_0$  имеет смысл некоторой «стандартной» дополнительной прибыли, так что  $\lambda(c_0) = \lambda_0$ . Такая аппроксимация возможна, если отклонения прибыли  $c(t)$  от  $c_0$  незначительны.

В этом случае уравнение (2) приобретает вид

$$a_1 \lambda(c) = a_1 \left( \lambda_0 + \lambda_1 - \lambda_1 \frac{c}{c_0} \right) = \frac{\kappa Q}{T-t},$$

откуда

$$c = c_0 \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{\kappa Q}{a_1 \lambda_1 (T-t)} \right).$$

Так как в единицу времени в среднем поступает  $\lambda(c)$  запросов на сырье, средний размер которых равен  $a_1$ , то среднее значение прибыли в единицу времени равно

$$ca_1 \lambda(c) = c_0 \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{\kappa}{a_1 \lambda_1} \frac{Q}{T-t} \right) \kappa \frac{Q}{T-t}.$$

Усредняя по количеству сырья  $Q(t)$ , имеющегося в наличии в момент времени  $t$ , получим

$$\begin{aligned} E\{ca_1 \lambda(c)\} &= c_0 \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right) \kappa \frac{\bar{Q}}{T-t} - c_0 \frac{\kappa^2}{a_1 \lambda_1} \frac{Q_2}{(T-t)^2} = \\ &= c_0 \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right) \kappa \frac{\bar{Q}}{T-t} - \frac{c_0 \kappa^2 D_0 + \bar{Q}^2}{a_1 \lambda_1 (T-t)^2} = \\ &= c_0 \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right) \kappa \frac{Q_0}{T-t} \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^\kappa - \frac{c_0 \kappa^2 Q_0}{a_1 \lambda_1 (T-t)^2} \times \\ &\times \left\{ \frac{a_2}{a_1} \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^\kappa \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^\kappa \right] + \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^{2\kappa} Q_0^2 \right\}. \end{aligned}$$

Средняя прибыль за производственный цикл равна

$$S = \int_0^T E\{ca_1 \lambda(c)\} dt. \quad (13)$$

Вычисляя интегралы в (13) получим

$$\begin{aligned} \int_0^T \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^\kappa \frac{dt}{T-t} &= \frac{1}{\kappa}, \quad \int_0^T \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^\kappa \frac{dt}{(T-t)^2} = \frac{1}{T(\kappa-1)}, \\ \int_0^T \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^{2\kappa} \frac{dt}{(T-t)^2} &= \frac{1}{T(2\kappa-1)}. \end{aligned}$$

Первый интеграл имеет смысл при  $\kappa > 0$ , второй интеграл конечен только при  $\kappa > 1$ , третий интеграл конечен только при  $\kappa > 0,5$ .

Следовательно, в аппроксимации (12) следует считать  $\kappa > 1$ . В этом случае

$$S = c_0 \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right) Q_0 - \frac{c_0 a_2 Q_0}{a_1^2 \lambda_1 T} \kappa^2 \left( \frac{1}{\kappa - 1} - \frac{1}{2\kappa - 1} \right) - \frac{c_0 Q_0^2}{a_1 \lambda_1 T} \frac{\kappa^2}{2\kappa - 1}. \quad (14)$$

Задача выбора оптимального значения  $\kappa$  имеет вид

$$\frac{c_0 Q_0}{a_1 \lambda_1 T} \left[ \frac{a_2}{a_1} \kappa^2 \left( \frac{1}{\kappa - 1} - \frac{1}{2\kappa - 1} \right) + Q_0 \frac{\kappa^2}{2\kappa - 1} \right] \Rightarrow \min_{\kappa},$$

или  $\varphi(\kappa) = \frac{\kappa^3}{(\kappa - 1)(2\kappa - 1)} + \frac{Q_0 a_1}{a_2} \frac{\kappa^2}{2\kappa - 1} \Rightarrow \min_{\kappa}.$

Полагая  $\varphi'(\kappa) = 0$ , получим уравнение

$$\frac{3\kappa^2(\kappa - 1)(2\kappa - 1) - \kappa^3(4\kappa - 3)}{(\kappa - 1)^2} + \frac{a_1 Q_0}{a_2} (2\kappa(2\kappa - 1) - 2\kappa^2) = 0,$$

или  $\frac{a_1 Q_0}{a_2} = -\frac{\kappa(2\kappa^2 - 6\kappa + 3)}{2(\kappa - 1)^3}, \quad (15)$

которое надо решить в области  $\kappa > 1$ .

Учитывая также, что правая часть (15) должна быть положительна, решение уравнения (15) следует искать в области  $1 < \kappa < \frac{3 + \sqrt{3}}{2} \approx 2,367$ .

График зависимости оптимального значения  $\kappa$  от параметра  $a_1 Q_0 / a_2$  приведен на рис. 1.

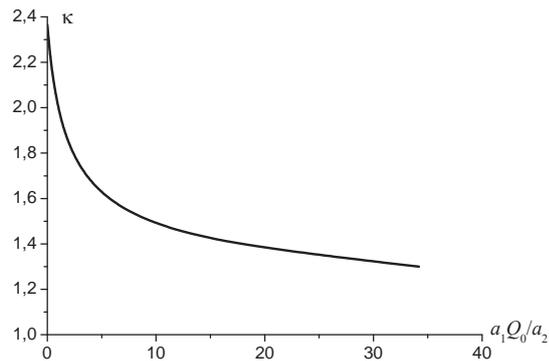


Рис. 1. Зависимость оптимального значения параметра управления  $\kappa$  от характеристики системы  $a_1 Q_0 / a_2$

Заметим, что при больших значениях  $a_1 Q_0 / a_2$  оптимальное значение  $\kappa$  мало отличается от 1. Полагая  $\kappa = 1 + \varepsilon$  получаем, что при малых  $\varepsilon$

$$-\frac{\kappa(2\kappa^2 - 6\kappa + 3)}{2(\kappa - 1)^3} \approx \frac{1}{2\varepsilon^3},$$

поэтому при  $a_1 Q_0 / a_2 \gg 1$  параметр  $\kappa \approx 1 + \sqrt[3]{\frac{a_2}{2a_1 Q_0}}$ .

### Оптимизация начального объема опционного ресурса

Так как стоимость единицы ресурса равна  $d$ , то дополнительная прибыль, получаемая при использовании ресурса объема  $Q_0$ , равна, с учетом (14)

$$P = \int_0^T E \{ c a_1 \lambda(c) \} dt - d Q_0 = c_0 \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right) Q_0 - d Q_0 - \frac{c_0 a_2 Q_0}{a_1^2 \lambda_1 T} \frac{\kappa^3}{(\kappa - 1)(2\kappa - 1)} - \frac{c_0 Q_0^2}{a_1 \lambda_1 T} \frac{\kappa^2}{2\kappa - 1}.$$

Оптимальный объем  $Q_0$  определяется из условия  $\partial P / \partial Q_0 = 0$ :

$$\frac{c_0 a_2}{a_1^2 \lambda_1 T} \frac{\kappa^3}{(\kappa - 1)(2\kappa - 1)} = \frac{2c_0 Q_0}{a_1 \lambda_1 T} \frac{\kappa^2}{2\kappa - 1},$$

откуда

$$Q_0 = \frac{a_1 \lambda_1 T}{2} \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{d}{c_0} \right) \frac{2\kappa - 1}{\kappa^2} - \frac{a_2}{2a_1} \frac{\kappa}{\kappa - 1}. \quad (16)$$

Рассмотрим систему уравнений (15) и (16), решающих задачу максимизации прибыли предприятия одновременно по величинам  $Q_0$  и  $\kappa$

$$\begin{cases} \frac{a_1}{a_2} Q_0 = -\frac{\kappa(2\kappa^2 - 6\kappa + 3)}{2(\kappa - 1)^3}, \\ Q_0 = \frac{a_1 \lambda_1 T}{2} \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{d}{c_0} \right) \frac{2\kappa - 1}{\kappa^2} - \frac{a_2}{2a_1} \frac{\kappa}{\kappa - 1}. \end{cases}$$

Исключая  $Q_0$ , получим уравнение для  $\kappa$ :

$$\frac{a_1^2 \lambda_1 T}{a_2} \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{d}{c_0} \right) = -\frac{\kappa^3(\kappa^2 - 4\kappa + 2)}{(\kappa - 1)^3(2\kappa - 1)}, \quad (17)$$

которое надо решить в области  $\kappa > 1$  и при условии  $\kappa^2 - 4\kappa + 2 < 0$ , т. е. в области  $1 < \kappa < 3,414$ .

Из (17), зная  $a_1, a_2, \lambda_0, \lambda_1, T, d$  и  $c_0$ , можно найти оптимальное значение  $\kappa$ , а затем и оптимальное значение объема партии опционного ресурса  $Q_0$ .

График функции  $\psi(\kappa) = -\frac{\kappa^3(\kappa^2 - 4\kappa + 2)}{(\kappa - 1)^3(2\kappa - 1)}$  в допустимой области приведен на рис. 2.

При больших  $\lambda_1 T$  левая часть уравнения (17) велика, и поэтому  $\kappa$  мало отличается от 1. Полагая  $\kappa = 1 + \varepsilon$ , придем к уравнению

$$\frac{a_1^2 \lambda_1 T}{a_2} \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{d}{c_0} \right) \approx \frac{1}{\varepsilon^3},$$

откуда

$$\kappa \approx 1 + \varepsilon = 1 + \sqrt[3]{\frac{a_2}{a_1^2 \lambda_1 T \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{d}{c_0} \right)}}$$

$$Q_0 \approx \frac{a_2}{2a_1 \varepsilon^3} = \frac{a_1 \lambda_1 T}{2} \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{d}{c_0} \right).$$

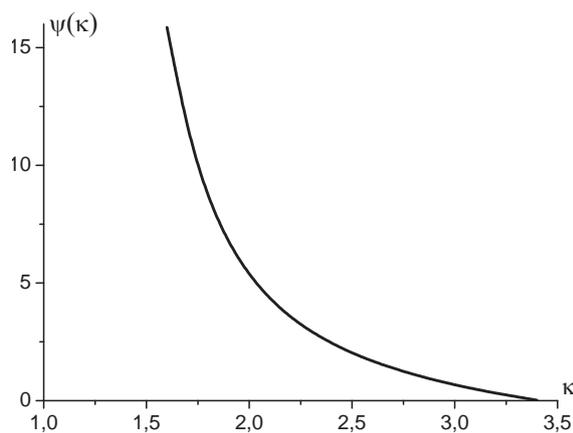


Рис. 2. График функции  $\psi(k)$ , определяющей оптимальное значение параметра управления  $k$

### Заключение

Предложена гибкая модель регулирования потока запросов на опционное сырье, позволяющая добиться полного использования опционного ресурса в производственном цикле. Получены уравнения (15) и (16), определяющие оптимальные параметры модели: начальный объем ресурса  $Q_0$  и параметр управления  $k$ , которые обеспечивают максимальную среднюю прибыль предприятия. Эти значения, вообще говоря, можно найти лишь численно. Получено выражение для плотности распределения вероятностей (11), полностью описывающее процесс использования опционного ресурса в диффузионном приближении и позволяющее найти распределение длительности использования ресурса, что даст возможность рассчитать оптимальную продолжительность производственного цикла  $T$ . Этот расчет составляет перспективы дальнейшей работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Китаева А.В., Степанова Н.В. Управление опционными ресурсами // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5. – С. 23–28.
2. Chatwin R.E. Optimal dynamic pricing of perishable products with stochastic demand and a finite set of prices // European Journal of Operational Research. – 2000. – V. 125. – P. 149–174.
3. Назаров А.А. Асимптотический анализ марковизируемых систем. – Томск: Изд-во Томского университета, 1991. – 166 с.
4. Harrison J.M. Brownian Motion and Stochastic Flow Systems. – New York: John Wiley and Sons, 1985. – 140 p.
5. Wee H.M., Chiamsiri S. Continuous-review inventory models using diffusion approximation for bulk queues // International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice. – 2012. – V. 19. – № 10. – P. 354–389.
6. Kitaeva A., Stepanova N. Diffusion approximation in inventory management // Book of Abstract of the 15<sup>th</sup> Applied Stochastic Models and Data Analysis International Conference (ASMDA2013). – Mataro (Barcelona), Spain, 25–28 June 2013. – International Society for the Advancement of Science and Technology, 2013. – P. 115.
7. Новицкая Е.В., Терпугов А.Ф. Оптимизация розничной продажи скоропортящейся продукции. – Томск: Изд-во Томского университета, 2004. – 93 с.
8. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 544 с.

Поступила 25.09.2013 г.

UDC 519.2

## INVENTORY CONTROL: FULLY RESOURCE USAGE IN PRODUCTION CYCLE

A.V. Kitaeva, N.V. Stepanova, A.F. Terpugov<sup>1</sup>

Tomsk Polytechnic University  
Tomsk State University

The paper considers the model of controlling optional resource with limited lifetime which should be completely used for the production cycle. The demand for the resource is of random character: the demand flow is Poisson with an intensity that is inversely related to the enterprise's additional profit, the purchases are i.i.d. random variables. The authors use a diffusion approximation to the system. The mean, the variance and the correlation function of the inventory level process are found. The optimization of the average additional profit is carried out in a case of linear dependence of the intensity of the profit; the optimal initial inventory level is also found.

### Key words:

Inventory control, yield management, fixed lifetime, stochastic demand, diffusion approximation.

## REFERENCES

1. Kitaeva A.V., Stepanova N.V. Upravlenie opsionnymi resursami [Control of optional resources]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 5, pp. 23–28.
2. Chatwin R.E. Optimal dynamic pricing of perishable products with stochastic demand and a finite set of prices. *European Journal of Operational Research*, 2000, vol. 125, pp. 149–174.
3. Nazarov A.A. *Asimptoticheskiy analiz markoviziruemykh sistem* [Asymptotic analysis of Markovian systems]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1991. 166 p.
4. Harrison J.M. *Brownian Motion and Stochastic Flow Systems*. New York, John Wiley and Sons, 1985. 140 p.
5. Wee H.M., Chiamsiri S. Continuous-review inventory models using diffusion approximation for bulk queues. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 2012, vol. 19, no. 10, pp. 354–389.
6. Kitaeva A., Stepanova N. Diffusion approximation in inventory management. *Book of Abstract of the 15<sup>th</sup> Applied Stochastic Models and Data Analysis International Conference (ASMDA2013)*. Mataro (Barcelona), Spain, 25–28 June 2013. International Society for the Advancement of Science and Technology, 2013. p. 115.
7. Novitskaya E.V., Terpugov A.F. *Optimizatsiya roznichnoy prodazhi skoroprotiyashcheyssya produktsii* [Optimization of retailing perishable products]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2004. 93 p.
8. Ditkin V.A., Prudnikov A.P. *Spravochnik po operatsionnomu ischisleniyu* [Reference book on operating calculus]. Moscow, Vysshaya shkola, 1965. 544 p.

УДК 621.52+511.52

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ  
ОБОБЩЕННЫХ ОБРАТНЫХ МАТРИЦ

С.О. Симонян

Государственный инженерный университет Армении (Политехник), г. Ереван  
E-mail: ssimonyan@seua.am

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью эффективного определения параметрических обобщенных обратных матриц Мура–Пенроуза, достаточно часто встречающихся при решении неавтономных линейных систем конечных уравнений, задач оптимального управления, неавтономных матричных уравнений, при сингулярном разложении, в задачах расщепления линейных динамических систем, при решении линейных многоточечных краевых задач, непрерывных задач математического программирования, при нахождении корней алгебраических многочленов с переменными коэффициентами и др.

**Цель работы:** разработка параллельных матрично-векторных и матричных вычислительных методов определения параметрических обобщенных обратных матриц Мура–Пенроуза.

**Методы исследования:** при решении рассматриваемой задачи были использованы методы линейной алгебры, теории матриц, дифференциальных преобразований, численных методов, параллельных вычислений, методы машинного моделирования, а также современные информационные технологии.

**Результаты:** доказана теорема об определении параметрических обобщенных обратных матриц на основе использования аппарата дифференциальных преобразований, сводящего решение непрерывной задачи к решению эквивалентной числовой задачи, обеспечивающую высокую эффективность вычислительных процедур.

**Ключевые слова:**

Параметрические матрицы, обобщенные обратные матрицы, дифференциальные преобразования, параллельные матрично-векторные и матричные вычислительные методы.

**Введение**

Для определения параметрических обобщенных обратных матриц

$$X(t) = A^+(t) \in R^{n \times m}$$

Мура–Пенроуза [1, 2] при параметрических матрицах  $A(t) \in R^{m \times x}$  (заметим, что параметр  $t$  может

быть временем, оператором Лапласа  $\left(S \sim \frac{d}{dt}\right)$  или

другим параметром) на основе дифференциальных преобразований Пухова [3] в работе [4] был предложен дифференциальный аналог (Д-аналог) определения  $X(t) \equiv A^{(1)}(t)$ , основанный на первом известном условии Мура–Пенроуза [1, 2]

$$A(t) = A(t)X(t)A(t), \quad (1)$$

а в работе [5] – Д-аналог определения  $X(t) \equiv A^{(2)}(t)$ , основанный на втором известном условии [1, 2]

$$X(t) = X(t)A(t)X(t). \quad (2)$$

При этом наряду с условиями (2) и (3) выполняются также третье и четвертое условия Мура–Пенроуза – условия симметричности [1, 2]

$$[A(t)X(t)]^T = A(t)X(t), \quad (3)$$

$$[X(t)A(t)]^T = X(t)A(t). \quad (4)$$

В настоящей работе для определения  $X(t)$  предлагаются параллельные матрично-векторные и матричные вычислительные методы, основанные на неявных последовательных рекуррентных вычислительных схемах, предложенных в работах [4, 5].

**Математический аппарат**

Дифференциальные преобразования параметрических матриц  $A(t)$  и  $X(t)$  соответственно имеют вид

$$A(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K A(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v},$$

$$K = \overline{0, \infty} \bullet A(t) = \mathfrak{N}_1(t, t_v, H, A(K)),$$

$$X(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K X(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v},$$

$$K = \overline{0, \infty} \bullet X(t) = \mathfrak{N}_2(t, t_v, H, X(K)),$$

где  $K = \overline{0, \infty}$  – целочисленный аргумент;  $A(K)$  и  $X(K)$ ,  $K = \overline{0, \infty}$  – матричные дискреты матричных оригиналов  $A(t)$  и  $X(t)$  соответственно с размерами  $m \times n$  и  $n \times m$  (прямые дифференциальные преобразования),  $H$  – масштабный коэффициент;  $t_v$  – центр аппроксимации;  $\mathfrak{N}_1(\bullet)$  и  $\mathfrak{N}_2(\bullet)$  – обратные дифференциальные преобразования, восстанавливающие оригиналы – матрицы  $A(t)$  и  $X(t)$  соответственно; символ  $\bullet$  – знак перехода из области оригиналов в область  $\mathbb{D}$ -изображений и наоборот [3].

1. На основе использования условия (1) и перевода его из области оригиналов в область  $\mathbb{D}$ -изображений в работе [4] была получена следующая неявная последовательная рекуррентная вычислительная схема для определения неизвестных матричных дискрет  $X(K)$ ,  $K = \overline{0, \infty}$  обобщенной обратной матрицы  $X(t)$ :

при  $K = 0$ :  $A(0) = A(0)X(0)A(0)$ ,  
 при  $K = 1$ :  $A(1) = A(1)X(0)A(0) + A(0)X(1)A(0) + A(0)X(0)A(1)$ ,  
 при  $K = 2$ :  $A(2) = A(2)X(0)A(0) + A(1)X(1)A(0) + A(1)X(0)A(1) + A(0)X(2)A(0) + A(0)X(1)A(1) + A(0)X(0)A(2)$ ,  
 при  $K = 3$ :  $A(3) = A(3)X(0)A(0) + A(2)X(1)A(0) + A(2)X(0)A(1) + A(1)X(2)A(0) + A(1)X(1)A(1) + A(1)X(0)A(2) + A(0)X(3)A(0) + A(0)X(2)A(1) + A(0)X(1)A(2) + A(0)X(0)A(3)$ ,  
 при  $K = K$ :  $A(K) =$

$$= X(0) \left[ A(K) - \sum_{\substack{p=K, q=K-1, r=K \\ p=0, q=0, r=0 \\ p+q+r=K}} A(p)X(q)A(r) \right] X(0). \quad (5)$$

В этой вычислительной схеме в правой части каждого матричного уравнения содержится  $0,5(K+1)(K+2)$  слагаемых. Этот факт может служить важным контрольным условием правильности вычислительных расчетов. Нетрудно убедиться также в том, что последовательную рекуррентную вычислительную схему (5) можно представить и в следующем матрично-векторном виде:

$$\begin{pmatrix} A(0) \\ A(1) \\ A(2) \\ \vdots \\ A(K) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A(0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A(1) & A(0) & 0 & \dots & 0 \\ A(2) & A(1) & A(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A(K) & A(K-1) & A(K-2) & \dots & A(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ \vdots \\ X(K) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A(0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ X(0) & X(0) & 0 & \dots & 0 \\ X(2) & X(1) & X(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X(K) & X(K-1) & X(K-2) & \dots & X(0) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A(0) \\ A(1) \\ A(2) \\ \vdots \\ A(K) \end{pmatrix}$$

или в компактной записи

$$A(\overline{0, K}) = \overline{A(0, K)} \cdot \overline{X(0, K)} \cdot \overline{A(0, K)}, \quad (6)$$

где  $\overline{A(0, K)} = [A(0) | A(1) | \dots | A(K)]^T$  – составной гипервектор-столбец-матрица с размерами  $(K+1)m \times n$ ;

$\overline{A(0, K)}$  – составная блочная нижнетреугольная гиперматрица с размерами  $(K+1)n \times (K+1)m$  с матричными элементами  $A(0), A(1), \dots, A(K)$  (с матричными элементами  $A(0)$  на главной диагонали, с матричными элементами  $A(1)$  на нижней поддиагонали и т. д. до матричного элемента  $A(K)$  включительно);

$\overline{X(0, K)}$  – составная блочная нижнетреугольная гиперматрица с размерами  $(K+1)n \times (K+1)m$  с матричными элементами  $X(0), X(1), \dots, X(K)$  (с матричными элементами  $X(0)$  на главной диагонали, с матричными элементами  $X(1)$  на нижней поддиагонали и т. д. до матричного элемента  $X(K)$  включительно).

Последовательную рекуррентную вычислительную схему (5) можно представить и в следующем, более сложном, матричном виде:

$$\begin{bmatrix} A(0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A(1) & A(0) & 0 & \dots & 0 \\ A(2) & A(1) & A(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A(K) & A(K-1) & A(K-2) & \dots & A(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A(1) & A(0) & 0 & \dots & 0 \\ A(2) & A(1) & A(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A(K) & A(K-1) & A(K-2) & \dots & A(0) \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} X(0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ X(1) & X(0) & 0 & \dots & 0 \\ X(2) & X(1) & X(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X(K) & X(K-1) & X(K-2) & \dots & X(0) \end{bmatrix} \bullet$$

$$\bullet \begin{bmatrix} \overline{A(0)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \overline{A(1)} & \overline{A(0)} & 0 & \dots & 0 \\ \overline{A(2)} & \overline{A(1)} & \overline{A(0)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{A(K)} & \overline{A(K-1)} & \overline{A(K-2)} & \dots & \overline{A(0)} \end{bmatrix}$$

или в компактной записи

$$\overline{A(0, K)} = \overline{A(0, K)} \cdot \overline{X(0, K)} \cdot \overline{A(0, K)}. \quad (7)$$

Однако, в отличие от матрично-векторного представления (6), полностью соответствующего вычислительной схеме (5), матричное представление (7) обладает достаточно высокой степенью избыточности: оно содержит  $K+1$  одинаковых соотношений для определения матричного дискрета  $X(0)$ ,  $K$  одинаковых соотношений для определения матричного дискрета  $X(1), \dots, 1$  соотношение для определения матричного дискрета  $X(K)$ . Иными словами, в этой схеме содержатся  $0,5(K+1)(K+2)$  матричных уравнений, ввиду чего ее избыточность равна  $0,5(K+1)(K+2) - (K+1) = 0,5K(K+1)$ . С другой стороны, несмотря на такую высокую избыточность, числовое представление (7), в отличие от числового представления (60), не обладающего избыточностью вообще, очевидно, является гипераналогом параметрического представления (23) с точностью до составных гиперматриц  $\overline{A(0, K)}$  и  $\overline{X(0, K)}$ , чем не обладает числовое представление (6). Отсюда следует весьма важное соотношение:

$$\overline{X(0, K)} = \overline{A(0, K)}^+. \quad (8)$$

2. На основе использования условия (3) и перевода его из области оригиналов в область Д-образований в работе [5] была получена следующая неявная последовательная рекуррентная вычислительная схема для определения неизвестных матричных дискрет  $X(K)$ ,  $K=0, \infty$  обобщенной обратной матрицы  $\overline{X(t)}$ :

при  $K = 0$ :  $X(0) = X(0)A(0)X(0)$ ,  
 при  $K = 1$ :  $X(1) = X(1)A(0)X(0) + X(0)A(1)X(0) + X(0)A(0)X(1)$ ,  
 при  $K = 2$ :  $X(2) = X(2)A(0)X(0) + X(1)A(1)X(0) + X(1)A(0)X(1) + X(0)A(2)X(0) + X(0)A(1)X(1) + X(0)A(0)X(2)$ ,  
 при  $K = 3$ :  $X(3) = X(3)A(0)X(0) + X(2)A(1)X(0) + X(2)A(0)X(1) + X(1)A(2)X(0) + X(1)A(1)X(1) + X(1)A(0)X(2) + X(0)A(3)X(0) + X(0)A(2)X(1) + X(0)A(1)X(2) + X(0)A(0)X(3)$ ,  
 $\vdots$   
 при  $K = K$ :  $X(K) = - \sum_{\substack{p=K-1, q=K, r=K-1 \\ p=0, q=0, r=0 \\ p+q+r=K}} X(p)A(q)X(r). \quad (9)$

В этой вычислительной схеме, как и в (5), в правой части каждого матричного уравнения также содержится  $0,5(K+1)(K+2)$  слагаемых. Этот факт и здесь может служить важным контрольным условием правильности вычислительных расчетов. Нетрудно убедиться также в том, что последовательную рекуррентную вычислительную схему (9) можно представить и в следующем матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \overline{X(0)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \overline{X(1)} & \overline{X(0)} & 0 & \dots & 0 \\ \overline{X(2)} & \overline{X(1)} & \overline{X(0)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{X(K)} & \overline{X(K-1)} & \overline{X(K-2)} & \dots & \overline{X(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{X(0)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \overline{X(1)} & \overline{X(0)} & 0 & \dots & 0 \\ \overline{X(2)} & \overline{X(1)} & \overline{X(0)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{X(K)} & \overline{X(K-1)} & \overline{X(K-2)} & \dots & \overline{X(0)} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \overline{A(0)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \overline{A(1)} & \overline{A(0)} & 0 & \dots & 0 \\ \overline{A(2)} & \overline{A(1)} & \overline{A(0)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{A(K)} & \overline{A(K-1)} & \overline{A(K-2)} & \dots & \overline{A(0)} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \overline{X(0)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \overline{X(1)} & \overline{X(0)} & 0 & \dots & 0 \\ \overline{X(2)} & \overline{X(1)} & \overline{X(0)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{X(K)} & \overline{X(K-1)} & \overline{X(K-2)} & \dots & \overline{X(0)} \end{bmatrix}$$

или в компактной записи

$$\overline{X(0, K)} = \overline{X(0, K)} \cdot \overline{A(0, K)} \cdot \overline{X(0, K)}, \quad (10)$$

где  $\overline{X(0, K)}$  и  $\overline{A(0, K)}$  – также составные блочные нижнетреугольные гиперматрицы с размерами  $(K+1)n \times (K+1)m$  и  $(K+1)m \times (K+1)n$ .

Числовое представление (10), в свою очередь, очевидно, является гипераналогом параметрического представления (2) с точностью до составных гиперматриц  $\overline{X(0, K)}$  и  $\overline{A(0, K)}$ . Отсюда также следует вышеприведенное важное соотношение (8), т. е.:

$$\overline{X(0, K)} = \overline{A(0, K)}^+. \quad (11)$$

**Замечание 1.** Таким образом, при использовании условий (1) и (2) Мура–Пенроуза получены соответствующие гипераналоги (7) и (10) с точностью до составных гиперматриц  $\overline{A(0, K)}$  и  $\overline{X(0, K)}$ . При этом естественно совпадение соотношений (8) и (11), что и должно было быть.

**Замечание 2.** Существование и единственность [1, 2] псевдообратной гиперматрицы (8) или (11), очевидно, гарантирует существование и единственность матричных дискрет  $X(0), X(1), \dots, X(K)$  и, следовательно, существование и единственность решения  $X(t)$ .

**Пример [6].** Рассмотрим параметрическую матрицу

$$H(S) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{S+1} & 0 \\ \frac{1}{(S+1)^2} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где  $S$  – оператор Лапласа, а  $H(S)$  – желаемая передаточная функция замкнутой системы автоматического управления. Не вдаваясь в подробности, заметим, что для решения задачи компенсации обратной связи в системе автоматического управления, помимо решения других задач, необходимо определить и обобщенную обратную матрицу  $H^+(S)$  [6–8]. С этой целью воспользуемся матрицей

$\overline{H(0,5)}$ . Очевидно, при маклореновском центре аппроксимации  $S_0=0$  и масштабном коэффициенте  $H=1$ , имеем

$$\begin{aligned} H(0) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & H(1) &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ H(2) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & H(3) &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -4 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ H(4) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 5 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & H(5) &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

и т. д., а также соотношения

$$\begin{aligned} H(0) \cdot X(0) &= E_{2 \times 2}, \\ X(0) \cdot H(0) &\neq E_{3 \times 3}, \end{aligned}$$

где  $X(0) = H^+(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ .

Следовательно, при  $K_{\max}=5$  гиперматрица  $\overline{H(0,5)}$  с размерами  $12 \times 18$  будет иметь следующий вид:

$$\overline{H(0,5)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -6 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Вычисление псевдообратной к этой гиперматрице гиперматрицы  $\overline{X(0,5)}$  применением пакета MATLAB [9] приводит к следующему:

$$\overline{H(0,5)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Следовательно, матричные дискреты

$$X(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad X(1) = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$X(2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad X(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad K \geq 3,$$

при которых решение  $X(t)$  имеет вид

$$\begin{aligned} H^+(S) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot S + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot S^2 = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & (1+S)^2 \\ (1+S) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

что точно совпадает с результатом, полученным в работах [6–8] другими методами.

С другой стороны, нетрудно убедиться, что

$$\begin{aligned} \overline{H(0,K)} \cdot \overline{X(0,K)} &= E_{12 \times 12}, \\ \overline{X(0,K)} \cdot \overline{H(0,K)} &\neq E_{18 \times 18}, \end{aligned}$$

которые, очевидно, аналогичны вышеприведенным соотношениям для матриц  $H(0)$  и  $X(0)$ . Кроме того, при этом имеют место и гипераналоги (7) и (10). Что же касается решения  $X(t)$ , то нетрудно

убедиться также, что при нем действительно выполняются и условия (2)–(5).

### Заключение

Таким образом, вне зависимости от использования предложенных вычислительных схем, для параллельного определения матричных дискрет  $X(0), X(1), X(2), \dots, X(K)$  необходимо лишь составить гиперматрицу  $\overline{A(0, K)}$  с использованием заранее определенных матричных дискрет  $A(0), A(1), A(2), \dots, A(K)$  и применением некоторого вычислительного метода нахождения числовых псевдообратных матриц [1, 2] рассчитать гиперматрицу  $\overline{A(0, K)}^+$ . Естественно, первый столбец или последняя строка этой гиперматрицы будут содержать искомые матричные дискреты  $X(0), X(1), X(2), \dots, X(K)$  или  $X(K), X(K-1), X(K-2), \dots, X(0)$  соответственно. Восстановление обобщенной обратной матрицы  $X(t)$  можно осуществить в соответствии с некоторым обратным дифференциальным преобразованием  $\mathfrak{N}_2(t, t_0, H, X(K))$ ,  $K=0, \infty$ .

Однако, к сожалению, уже при небольших размерах параметрических матриц  $A(t)$  и использовании небольшого количества матричных дискрет обобщенных обратных матриц размерность гиперматриц  $\overline{A(0, K)}$  быстро возрастает и для вычисления псевдообратной к ней гиперматрицы  $\overline{X(0, K)}$

может потребоваться достаточно большое машинное время при использовании традиционных последовательных способов обработки данных [10]. Так, при рассмотренной матрице  $H(S)$  с размерами  $2 \times 3$  и количестве матричных дискрет 6 ( $K=0, 5$ ) размерность гиперматрицы  $\overline{H(0, K)}$  уже равна  $12 \times 18$ . Следовательно, ввиду такого обстоятельства, целесообразно использование эффективных вычислительных методов определения числовых псевдообратных матриц [1, 2, 9], ибо при решении больших задач вопрос об эффективности применяемого метода может оказаться ключевым [10. С. 221].

Наконец, сформулируем следующее важное утверждение:

**Теорема.** Если параметрическая матрица  $A(t)$  аналитическая (т. е. в центре аппроксимации  $t_0$  существуют матричные дискреты  $A(K)$ ,  $K=0, \infty$ ), то параметрическую обобщенную к ней матрицу Мура–Пенроуза  $X(t)=A(t)^+$  можно определить некоторым обратным дифференциальным преобразованием, при этом заранее составляя блочную нижнетреугольную гиперматрицу  $\overline{A(0, K)}$  на основе использования матричных дискрет  $A(K)$ ,  $K=0, \infty$  и вычислив числовую псевдообратную к ней гиперматрицу  $\overline{X(0, K)} = \overline{A(0, K)}^+$ , содержащую матричные дискреты  $X(K)$ ,  $K=0, \infty$  искомой параметрической обобщенной обратной матрицы  $X(t)$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ben-Israel A., Greville T.N.E. Generalized Inverses. Theory and Applications. – USA: Interscience Publication, 2002. – 371 p.
2. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Физматлит, 2010. – 560 с.
3. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели. – Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с.
4. Симонян С.О., Аветисян А.Г., Симонян А.С. Метод определения параметрических обобщенных обратных матриц (I) // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2008. – Т. LXI. – № 3. – С. 452–463.
5. Симонян С.О., Аветисян А.Г., Симонян А.С. Метод определения параметрических обобщенных обратных матриц (II) // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2008. – Т. LXI. – № 4. – С. 584–591.
6. Karampetakis N.P. Computation of the Generalized Inverse of a Polynomial Matrix and Applications // Linear Algebra Appl. – 1995. – V. 252. – P. 35–60.
7. Бадалян Л.А. Разработка методов определения псевдообратных нестационарных матриц и автоматизация вычислительных процедур: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ереван, 2007. – 24 с.
8. Симонян А.С. Разработка численно-аналитических методов определения параметрических обобщенных обратных матриц Мура–Пенроуза и автоматизация вычислительных процедур: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ереван, 2013. – 24 с.
9. The MathWorks, Inc., MATLAB The language of technical programming. Using MATLAB Graphics, Version 7.
10. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 608 с.

Поступила 30.09.2013 г.

## PARALLEL COMPUTING METHODS TO DETERMINE PARAMETRIC GENERALIZED INVERSE MATRICES

S.H. Simonyan

State Engineering University of Armenia (Polytechnic), Yerevan

**The relevancy of the work** is conditioned by the necessity to determine effectively the Moore–Penrose generalized parametric inverse matrices which are quite often encountered when solving non-autonomous linear systems of finite equations, optimal control problems, non-autonomous matrix equations, singular decomposition problems, linear dynamic system splitting problems, linear multipoint boundary value problems, continuous tasks of mathematical programming problems, when finding out the roots of algebraic polynomials with variable coefficients.

**Work objective** is to develop matrix-vector and array computational methods for determining Moore–Penrose generalized parametric inverse matrices.

**Methods of research:** when solving the problem in question the following methods were used: linear algebra methods, matrix theory, differential transformation theory, numerical technique theory, parallel computing theory, computer modeling methods and data engineering.

**Results:** The author has proved the theorem of determining the generalized parametric inverse matrices based on application of the differential transformation apparatus, reducing the solution of the continuous task to solution of the equivalent numeric problem providing high effectiveness of computational procedures.

### Key words:

Parametric matrices, parametric generalized inverse matrices, differential transformations, parallel matrix-vector and matrix computational methods.

### REFERENCES

1. Ben-Israel A., Greville T.N.E. *Generalized Inverses. Theory and Applications*. USA, A. Wiley, Interscience Publication, 2002. 371 p.
2. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 560 p.
3. Pukhov G.E. *Differentsialnye spektry i modeli* [Differential spectra and models]. Kiev, Naukova dumka, 1990. 184 p.
4. Simonyan S.O., Avetisyan A.G., Simonyan A.S. Metod opredeleniya parametricheskikh obobshchennykh obratnykh matrits (I) [Method for determining parametric generalized inverse matrices]. *Izvestiya NAN RA i GIUA. Ser. TN*, 2008, vol. LXI, no. 3, pp.452–463.
5. Simonyan A.S. Metod opredeleniya parametricheskix obobshchennykh obratnykh matrits (II) [Method for determining parametric generalized inverse matrices]. *Izvestiya NAN RA i GIUA. Ser. TN*, 2008, vol. LXI, no. 4, pp. 584–591.
6. Karampetakis N.P. Computation of the Generalized Inverse of a Polynomial Matrix and Applications. *Linear Algebra Appl.*, 1995, vol. 252, pp. 35–60.
7. Badalyan L.A. *Razrabotka metodov opredeleniya psevdobratnykh nestatsionarnykh matrits i avtomatizatsiya vychislitelnykh protsedur*. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Development of methods to determine pseudoinverse nonsteady matrices and computer procedure automation. Cand. tech. sci. diss. abstr.]. Erevan, 2007. 24 p.
8. Simonyan A.S. *Razrabotka chislenno-analiticheskikh metodov opredeleniya parametricheskikh obobshchennykh obratnykh matrits Mura–Penrouza i avtomatizatsiya vychislitelnykh protsedur*. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Development of numerical analytic methods for determining parametric generalized inverse matrices of Moore–Penrose and computer procedure automation. Cand. tech. sci. diss. abstr.]. Erevan, 2013. 24 p.
9. *The MathWorks, Inc., MATLAB The language of technical programming. Using MATLAB Graphics, Version 7*.
10. Voevodin V.V., Voevodin V.I. *Parallelnye vychisleniya* [Parallel computing]. Saint-Petersburg, BXV-Peterburg Publ., 2004. 608 p.

УДК 519.872

ИССЛЕДОВАНИЕ RQ-СИСТЕМЫ  $M|GI|1$  С ВЫТЕСНЕНИЕМ В УСЛОВИИ БОЛЬШОЙ ЗАДЕРЖКИ

А.А. Назаров, Я.Е. Черникова

Томский государственный университет  
E-mail: evgenevna.92@mail.ru*Актуальность работы обусловлена широким применением RQ-систем в повседневной жизни.***Цель работы:** исследовать RQ-систему  $M|GI|1$  с вытеснением, найти совместное распределение вероятностей числа заявок в источнике повторных вызовов и состояния прибора.**Методы исследования:** Для достижения цели был использован метод асимптотического анализа в условии большой задержки. Была найдена первая асимптотика, в которой обнаружили стационарное распределение вероятностей состояния прибора. Также получена пропускная способность RQ-системы  $M|GI|1$  с вытеснением. Найдено условие существования стационарного режима, затем вторая асимптотика, где показан вид асимптотической характеристической функции числа заявок в источнике повторных вызовов.**Результаты:** Найдена пропускная способность  $S$  RQ-системы  $M|GI|1$  с вытеснением. На основе этого сделаны выводы об условии существования стационарного режима. Была найдена асимптотическая характеристическая функция числа заявок в источнике повторных вызовов при конечном ненулевом значении  $S$ . Показано, что она является характеристической функцией случайной величины, распределенной по нормальному закону.**Ключевые слова:**

RQ-система, асимптотический анализ, загрузка системы, пропускная способность.

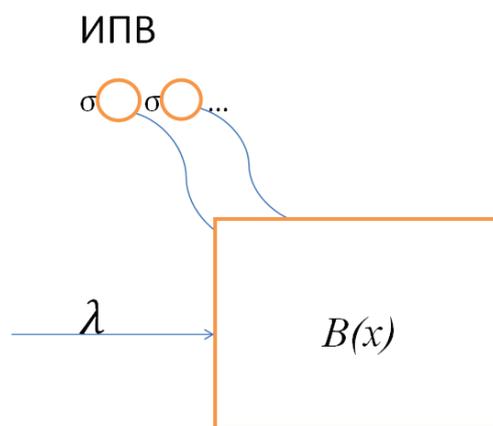
В теории систем массового обслуживания (ТСМО) [1, 2] различают системы с очередью, с потерями, смешанные, но особый интерес представляют системы с повторными вызовами (Retrial Queue Systems или RQ-системы). Это обусловлено их широким практическим применением. Системы с повторными вызовами используют для анализа и исследования процессов функционирования телекоммуникационных и компьютерных систем, проектирования телефонных сетей, мобильных сотовых радиосетей и во многих других областях.

Первые RQ-системы описаны Г. Гоштони [3], Дж. Темплтона [4]. В работах Г.И. Фалина [4–6] и Дж. Арголехо [7, 8] были получены допредельные характеристические функции, а также рассмотрены разнообразные методы исследования RQ-систем  $M|M|1$ ,  $M|GI|1$  и др.

Г.Л. Ионин (G.L. Jonin), Г.И. Фалин (G.I. Falin), Ю.И. Сухарев (Yu.I. Sukharev) и др. рассмотрели RQ-систему с конфликтами. В работах Е.А. Судыко, А.А. Назарова [9, 10] были исследованы различные модели с конфликтами, в том числе система  $M|GI|1$ . Рассмотрение таких систем предполагает, что если в момент прихода заявки в систему прибор занят, то заявки попадают в состояние конфликта и обе переходят в ИПВ. Также большой интерес представляет ситуация, когда заявка, нашедшая прибор занятым в момент прибытия ее в систему, вытесняет заявку, находящуюся на обслуживании, и сама встает на обслуживание.

Настоящая работа посвящена исследованию RQ-системы  $M|GI|1$  с вытеснением заявки из прибора. Исследование проводится при помощи метода асимптотического анализа [11] в условии большой задержки.

Рассмотрим RQ-систему с ИПВ (источником повторных вызовов) (рисунок).

Рисунок. RQ-система  $M|GI|1$  с вытеснением

На вход системы поступает простейший поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ . Требование, заставшее прибор свободным, занимает его для обслуживания в течение случайного времени с функцией распределения  $B(x)$ . Если прибор занят, то поступившая заявка вытесняет обслуживаемую и сама встает на прибор, а заявка, которая обслуживалась, переходит в ИПВ, где осуществляет случайную задержку, продолжительность которой имеет экспоненциальное распределение с параметром  $\sigma$ . Из ИПВ после случайной задержки заявка вновь встает на прибор. Если прибор свободен, то заявка занимает его на случайное время обслуживания, если же он занят, то заявка из ИПВ вытесняет обслуживаемую, которая уходит в ИПВ.

Обозначим  $i(t)$  число заявок в ИПВ,  $k(t)$  определяет состояние прибора следующим образом:

$$k(t) = \begin{cases} 0, & \text{прибор свободен,} \\ 1, & \text{прибор занят.} \end{cases}$$

Ставится задача исследования процесса  $\{k(t), i(t)\}$ . Так как исследуемый процесс не является марковским, то рассмотрим процесс с переменным числом компонент.

Если  $k(t)=0$ , то рассматриваем процесс  $\{k(t), i(t)\}$ . Если  $k(t)=1$ , то рассматриваем процесс  $\{k(t), i(t), z(t)\}$ , где  $z(t)$  остаточное время от момента  $t$  до момента окончания обслуживания.

Обозначим  $P\{k(t)=0, i(t)=i\}=P(0, i, t)$  вероятность того, что прибор в момент времени  $t$  находится в состоянии 0, и в источнике повторных вызовов находится  $i$  заявок;  $P\{k(t)=1, i(t)=i, z(t)<z\}=P(1, i, z, t)$  вероятность того, что прибор в момент времени находится в состоянии 1, остаточное время обслуживания меньше  $z$ , и в источнике повторных вызовов находится  $i$  заявок.

Для распределения вероятностей  $\{P(0, i, t), P(1, i, z, t)\}$ , применяя формулу полной вероятности, запишем равенства:

$$\begin{cases} P(1, i, z - \Delta t, t + \Delta t) = P(0, i, t) \lambda \Delta t B(z) + \\ + [P(1, i, z, t) - P(1, i, \Delta t, t)] (1 - \lambda \Delta t) (1 - i \sigma \Delta t) + \\ + P(1, i, \infty, t) i \sigma \Delta t B(z) + P(1, i - 1, \infty, t) \lambda \Delta t B(z) + \\ + P(0, i + 1, t) (i + 1) \sigma \Delta t B(z) + o(\Delta t), \\ P(0, i, t + \Delta t) = P(0, i, t) (1 - i \sigma \Delta t) (1 - \lambda \Delta t) + \\ + P(1, i, \Delta t, t) + o(\Delta t). \end{cases}$$

Отсюда прямая система дифференциальных уравнений Колмогорова будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial P(1, i, z, t)}{\partial t} - \frac{\partial P(1, i, z, t)}{\partial z} + \frac{\partial P(1, i, 0, t)}{\partial z} = \\ = \lambda B(z) P(0, i, t) - (\lambda + i \sigma) P(1, i, z, t) + \\ + (\lambda + i \sigma) P(1, i, \Delta t, t) + i \sigma B(z) P(1, i, \infty, t) + \\ + \lambda B(z) P(1, i - 1, \infty, t) + (i + 1) \sigma B(z) P(0, i + 1, t), \\ \frac{\partial P(0, i, t)}{\partial t} - \frac{\partial P(1, i, 0, t)}{\partial z} = -(\lambda + i \sigma) P(0, i, t), \end{cases}$$

в которой применяется обозначение

$$\left. \frac{\partial P(1, i, 0, t)}{\partial z} - \frac{\partial P(1, i, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0}.$$

Будем полагать, что система функционирует в стационарном режиме, то есть

$$P(0, i, t) \equiv P(0, i), \quad P(1, i, z, t) \equiv P(1, i, z).$$

Запишем систему для стационарного распределения:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P(1, i, z)}{\partial z} + \frac{\partial P(1, i, 0)}{\partial z} = \lambda B(z) P(0, i) - \\ - (\lambda + i \sigma) P(1, i, z) + i \sigma B(z) P(1, i, \infty) + \\ + \lambda B(z) P(1, i - 1, \infty) + (i + 1) \sigma B(z) P(0, i + 1), \\ -\frac{\partial P(1, i, 0)}{\partial z} = -(\lambda + i \sigma) P(0, i). \end{cases} \quad (1)$$

Перейдем в системе (1) к частичным характеристическим функциям вида

$$H(0, u) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{ju i} P(0, i),$$

$$H(1, u, z) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{ju i} P(1, i, z),$$

где  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

Учитывая, что

$$-j \frac{\partial H(0, u)}{\partial u} = \sum_i i e^{ju i} P(0, i),$$

$$-j \frac{\partial H(1, u, z)}{\partial u} = \sum_i i e^{ju i} P(1, i, z),$$

$$H(1, u, \infty) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{ju i} P(1, i, \infty) = H(1, u),$$

система уравнений переписывается в виде:

$$\begin{cases} -\frac{\partial H(1, u, z)}{\partial z} + \frac{\partial H(1, u, 0)}{\partial z} = H(0, u) \lambda B(z) - \\ - \lambda H(1, u, z) + j \sigma \frac{\partial H(1, u, z)}{\partial u} - j \sigma B(z) \frac{\partial H(1, u)}{\partial u} - \\ - j \sigma B(z) e^{-ju} \frac{\partial H(0, u)}{\partial u} + \lambda B(z) e^{ju} H(1, u), \\ -\frac{\partial H(1, u, 0)}{\partial z} = -\lambda H(0, u) + j \sigma \frac{\partial H(0, u)}{\partial u}. \end{cases} \quad (2)$$

Аналитически данную систему решить затруднительно. Будем решать ее методом асимптотического анализа в условии большой задержки ( $\sigma \rightarrow 0$ ).

#### Асимптотика первого порядка

В системе (2) сделаем замены

$$\sigma = \varepsilon,$$

$$u = \varepsilon w,$$

$$H(0, u) = F_1(0, w, \varepsilon),$$

$$H(1, u, z) = F_1(1, w, z, \varepsilon).$$

И получим

$$\begin{cases} \lambda B(z) F_1(0, w, \varepsilon) - \lambda F_1(1, w, z, \varepsilon) + \\ + j \varepsilon \frac{\partial F_1(1, w, z, \varepsilon)}{\partial(w \varepsilon)} - j \varepsilon B(z) \frac{\partial F_1(1, w, \infty, \varepsilon)}{\partial(w \varepsilon)} - \\ - j \varepsilon B(z) e^{-j w \varepsilon} \frac{\partial F_1(0, w, \varepsilon)}{\partial(w \varepsilon)} + \\ + \lambda B(z) e^{j w \varepsilon} F_1(1, w, \infty, \varepsilon) = \\ = -\frac{\partial F_1(1, w, z, \varepsilon)}{\partial z} + \frac{\partial F_1(1, w, 0, \varepsilon)}{\partial z}, \\ -\lambda F_1(0, w, \varepsilon) + j \varepsilon \frac{\partial F_1(0, w, \varepsilon)}{\partial(w \varepsilon)} = \\ = -\frac{\partial F_1(1, w, 0, \varepsilon)}{\partial z}. \end{cases} \quad (3)$$

Сформулируем следующее утверждение.

**Теорема 1.** Предельное (при  $\varepsilon \rightarrow 0$ ) значение  $\{F_1(0, w), F_1(1, w, z)\}$  решения  $\{F_1(0, w, \varepsilon), F_1(1, w, z, \varepsilon)\}$  системы уравнений (3) имеет вид

$$F_1(0, w) = R_0 e^{jw\kappa_1},$$

$$F_1(1, w, z) = R_1(z) e^{jw\kappa_1},$$

где величины  $R_0, R_1(z)$  удовлетворяют следующим выражениям:

$$R_0 = \int_0^\infty e^{-(\lambda+\kappa_1)z} dB(z),$$

$$R_1(z) = e^{(\lambda+\kappa_1)z} (\lambda + \kappa_1) \int_0^z e^{-(\lambda+\kappa_1)x} (R_0 - B(x)) dx,$$

а  $\kappa_1$  является решением уравнения

$$\lambda = (\lambda + \kappa_1) \int_0^\infty e^{-(\lambda+\kappa_1)x} dB(x).$$

Загрузкой  $\rho$  системы будем называть произведение интенсивности поступления требований в систему и среднего времени обслуживания одного требования одним обслуживающим устройством ( $\rho = \lambda b$ ).

Пропускной способностью  $S$  будем называть точную верхнюю границу тех значений загрузки  $\rho = \lambda b$ , для которых в математической модели существует стационарный режим.

Нетрудно показать, что в данной модели значение пропускной способности имеет вид:  $S = bB'(0)$  где

$$S = \begin{cases} 0, & B'(0) = 0 \\ B'(0) = 0, & 0 < B'(0) < \infty. \\ \infty, & B'(0) = \infty \end{cases}$$

Пример распределения, которое охватывает эти варианты, является распределение Вейбулла:

$$B(x) = k\mu(x\mu)^{k-1} e^{-(x\mu)^k}.$$

Так как при  $k < 1$  мы получаем, что  $B'(0) = \infty$ , то есть  $S = \infty$ , при  $k = 1$  имеем экспоненциальное распределение с параметром  $\mu B'(0) = \mu$ , при  $k > 1$   $B'(0) = 0$ , то есть  $S = 0$ .

Можно записать:

$$S = \begin{cases} 0, & k > 1 \\ 1, & k = 1. \\ \infty, & k < 1 \end{cases}$$

### Асимптотика второго порядка

Для более детального исследования рассматриваемой RQ-системы, найдем асимптотику второго порядка. В системе (2) выполним замены:

$$H(0, u) = H_2(0, u) e^{\frac{u}{\sigma\kappa_1}},$$

$$H(1, u, z) = H_2(1, u, z) e^{\frac{u}{\sigma\kappa_1}}. \quad (4)$$

Заменим:

$$\sigma = \varepsilon^2,$$

$$u = \varepsilon w,$$

$$H_2(0, u) = F_2(0, w, \varepsilon),$$

$$H_2(1, u, z) = F_2(1, w, z, \varepsilon). \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в (2) имеем:

$$\begin{cases} \lambda B(z) F_2(0, w, \varepsilon) - \lambda F_2(1, w, z, \varepsilon) + \\ + j\varepsilon \frac{\partial F_2(1, w, z, \varepsilon)}{\partial w} - \kappa_1 F_2(1, w, z, \varepsilon) - \\ - j\varepsilon B(z) \frac{\partial F_2(1, w, \infty, \varepsilon)}{\partial w} + \kappa_1 B(z) F_2(1, w, \infty, \varepsilon) - \\ - j\varepsilon B(z) e^{-jw\varepsilon} \frac{\partial F_2(0, w, \varepsilon)}{\partial w} + \\ + \kappa_1 B(z) e^{-jw\varepsilon} F_2(0, w, \varepsilon) + \lambda B(z) e^{jw\varepsilon} F_2(1, w, \infty, \varepsilon) = \\ = - \frac{\partial F_2(1, w, z, \varepsilon)}{\partial z} + \frac{\partial F_2(1, w, 0, \varepsilon)}{\partial z} + O(\varepsilon^2), \\ - \lambda F_2(0, w, \varepsilon) + j\varepsilon \frac{F_2(0, w, \varepsilon)}{\partial w} - \kappa_1 F_2(0, w, \varepsilon) = \\ = - \frac{\partial F_2(1, w, 0, \varepsilon)}{\partial z} + O(\varepsilon^2). \end{cases} \quad (6)$$

Сформулируем следующее утверждение.

**Теорема 2.** Предельное (при  $\varepsilon \rightarrow 0$ ) значение  $\{F_2(0, w), F_2(1, w, z)\}$  решения  $\{F_2(0, w, \varepsilon), F_2(1, w, z, \varepsilon)\}$  системы уравнений (6) имеет вид

$$F_2(0, w) = R_0 \Phi_2(w),$$

$$F_2(1, w, z) = R_1(z) \Phi_2(w),$$

где

$$\Phi_2(w) = \exp\left\{\frac{(jw)^2}{2} \kappa_2\right\},$$

$$\kappa_2 = \frac{\lambda R_1}{(R_0 - R_1^*(\lambda + \kappa_1))},$$

величины  $R_0, R_1(z), R_1, R_1^*(\lambda + \kappa_1)$  удовлетворяют следующим выражениям

$$R_0 = \int_0^\infty e^{-(\lambda+\kappa_1)z} dB(z) = B^*(\lambda + \kappa_1),$$

$$R_1(z) = e^{(\lambda+\kappa_1)z} (\lambda + \kappa_1) \int_0^z e^{-(\lambda+\kappa_1)x} (R_0 - B(x)) dx,$$

$$R_1 = 1 - R_0,$$

$$R_1^*(\lambda + \kappa_1) = \int_0^\infty z e^{-(\lambda+\kappa_1)z} dB(z).$$

Найдем характеристическую функцию  $h(u)$  числа заявок в ИПВ. Выполнив обратные к (5) замены, получим

$$h(u) = (H_2(0, u) + H_2(1, u, \infty)) e^{\frac{u}{\sigma\kappa_1}},$$

где

$$H_2(0, u) \approx R_0 \Phi_2\left(\frac{u}{\sqrt{\sigma}}\right),$$

$$H_2(1, u, \infty) \approx R_1 \Phi_2\left(\frac{u}{\sqrt{\sigma}}\right),$$

$$h(u) = \Phi_2\left(\frac{u}{\sqrt{\sigma}}\right) e^{\frac{u}{\sigma\kappa_1}},$$

$$h(u) = \exp\left\{ju \frac{\kappa_1}{\sigma} + \frac{(ju)^2}{2} \frac{\kappa_2}{\sigma}\right\}.$$

Мы получили характеристическую функцию нормального распределения с математическим ожиданием  $m = \frac{\kappa_1}{\sigma}$  и дисперсией  $D = \frac{\kappa_2}{\sigma}$ .

#### Выводы

В работе найдена пропускная способность  $S$  рассматриваемой системы. На основе этого сделаны выводы об условии существования стационарного режима. Была найдена асимптотическая характеристическая функция числа заявок в ИПВ

при конечном ненулевом значении  $S$ . Показано, что она является характеристической функцией случайной величины, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием  $m = \frac{\kappa_1}{\sigma}$

и дисперсией  $D = \frac{\kappa_2}{\sigma}$ . В дальнейшем планируется

выполнить исследование рассматриваемой RQ-системы, когда не существует стационарного режима.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: КомКнига, 2007. – 336 с.
2. Кёниг Д., Шгойян Д. Методы теории массового обслуживания. – М.: Радио и связь, 1981. – 128 с.
3. Гоштони Г. Сравнение вычисленных и моделированных результатов для пучков соединительных линий при наличии повторных попыток установления связи // Материалы VIII ИТС. – Сидней, 1977. – № 1. – С. 1–16.
4. Falin G.I., Templeton J.G.C. Retrial queues. – L.: Chapman & Hall, 1997. – 328 p.
5. Falin G.I. Asymptotic investigation of fully available switching systems with high repetition intensity of blocked calls // Moscow University Mathematics Bulletin. – 1984. – V. 39. – № 6. – P. 72–77.
6. Falin G.I. A Survey of Retrial Queues // Queuing Systems. – 1990. – V. 7. – P. 127–167.
7. Artalejo J.R., Gomez-Coral A. Retrial queuing systems: a computational approach. – Berlin: Springer, 2008. – 267 p.
8. Artalejo J.R., Joshua V.C., Krashnamoorthy A. An M/G/1 retrial queue with orbital search by the server. Advances in Stochastic Modeling. – New Jersey: Notable publications, 2002. – P. 41–54.
9. Назаров А.А., Судыко Е.А. Метод асимптотических семиинвариантов для исследования математической модели сети случайного доступа // Проблемы передачи информации. – 2010. – № 1. – С. 94–111.
10. Назаров А.А., Моисеева С.П. Методы асимптотического анализа в теории массового обслуживания. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 112 с.
11. Боровков А.А. Асимптотические методы в теории массового обслуживания. – М.: Наука, 1980. – 381 с.

Поступила 30.06.2013 г.

UDC 519.872

### INVESTIGATION OF PREEMPTIVE RQ-SYSTEM $M|GI|1$ UNDER EXTENSIVE DELAY

A.A. Nazarov, Ya.E. Chernikova

Tomsk State University

*The relevance of work* is caused by wide application of RQ-systems in everyday life.

*The main aim of the study* is to investigate the preemptive RQ-system  $M|GI|1$ , to find out joint distribution of probabilities of the demand number in a source of repeated calls and the device conditions.

*The methods used in the study:* To achieve the aim the asymptotic analysis was used under extensive delay. The authors found the first asymptotics in which stationary distribution of the device condition probabilities was determined. The capacity of preemptive RQ-system of  $M|GI|1$  was obtained as well. The authors found out a condition of existence of a stationary mode the second asymptotics where the asymptotic characteristic function of a number of demands in a source of repeated calls was shown.

*The results:* The capacity  $S$  is found in the preemptive RQ-system of  $M|GI|1$  operation. Based on this fact the conclusions were drawn on stationary mode existence. The asymptotic characteristic function of a number of demands in a source of repeated calls was found out at final nonzero value  $S$ . It was shown that it is the characteristic function of a random variable distributed by a normal probability law.

#### Key words:

RQ-system, asymptotic analysis, system loading, capacity.

REFERENCES

- Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. *Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya* [Introduction into queuing theory]. Moscow, Kom-Kniga Publ., 2007. 336 p.
- Koenig D., Shtoyan D. *Metody teorii massovogo obsluzhivaniya* [Queuing theory methods]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1981. 128 p.
- Goshtoni G. Sravnenie vychislennykh i modelirovannykh rezultatov dlya puchkov soedinitelnykh liniy pri nalichii povtornykh popytok ustanovleniya svyazi [Comparison of calculated and simulated results for connecting line bunches at repeated attempts to establish communication]. *VIII ITC Materials*. Sydney, 1977, no. 1, pp. 1–16.
- Falin G.I. Templeton J.G.C. *Retrial queues*. London, Chapman & Hall, 1997. 328 p.
- Falin G.I. Asymptotic investigation of fully available switching systems with high repetition intensity of blocked calls. *Moscow University Mathematics Bulletin*, 1984, vol. 39, no. 6, pp. 72–77.
- Falin G.I. A Survey of Retrial Queues. *Queuing Systems*, 1990, vol. 7, pp. 127–167
- Artalejo J.R., Gomez-Coral A. *Retrial queuing systems: and computational approach*. Berlin, Springer, 2008. 267 p.
- Artalejo J.R., Joshua V.C., Krashnamoorthy A. *An M/G/1 retrial queue with orbital search by the server*. *Advances in Stochastic Modeling*. New Jersey, Notable publications, 2002. pp. 41–54.
- Nazarov A.A., Sudyko E.A. Metod asimptoticheskikh seminvariantov dlya issledovaniya matematicheskoy modeli seti sluchaynogo dostupa [Method of asymptotic seven-invariants for research of mathematical model of a network of casual access]. *Problemy peredachi informatsii*, 2010, no. 1, pp. 94–111.
- Nazarov A.A., Moiseyev S.P. *Metody asimptoticheskogo analiza v teorii massovogo obsluzhivaniya* [Methods of asymptotic analysis in the queuing theory]. Tomsk, NTL Publ. house, 2006. 112 p.
- Borovkov A.A. *Asimptoticheskie metody v teorii massovogo obsluzhivaniya* [Asymptotic methods in queuing theory]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 381 p.

УДК 519.688:622.276.5.001.42

АДАПТИВНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВОЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН С ДИАГНОСТИКОЙ ПОТОКОВ

Е.В. Романова, В.Л. Сергеев

Томский политехнический университет  
E-mail: Romanova88EV@mail.ru; SergeevVL@ignd.tpu.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью диагностики потоков при адаптивной интерпретации нестационарных гидродинамических исследований горизонтальных скважин с использованием аналитических моделей кривой восстановления давления.

**Цель работы:** разработка метода адаптивной интерпретации кривой восстановления давления, позволяющего диагностировать потоки в процессе проведения гидродинамических исследований горизонтальных скважин с одновременной оценкой фильтрационных параметров пласта.

**Методы исследования:** использованы теоретические и практические разработки в области гидродинамических исследований скважин, системного анализа, идентификации систем с учетом дополнительной априорной информации, оптимизации функций и линейной алгебры. Решение задач диагностики потоков, идентификации и интерпретации кривой восстановления давления проводилось на основе промысловых данных забойного давления на скважине с учетом экспертных оценок фильтрационных параметров пласта с использованием компьютерной программы *Saphir*.

**Результаты:** разработан адаптивный метод интерпретации кривой восстановления давления с диагностикой радиального и линейного потоков с одновременной оценкой фильтрационных параметров нефтяного пласта в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин. На примере обработки результатов гидродинамических исследований по кривой восстановления давления двух горизонтальных скважин однородно-пористого нефтяного пласта показано, что метод адаптивной интерпретации позволяет повысить надежность определения времени начала радиального и линейного потоков.

**Ключевые слова:**

Интерпретация, диагностика, гидродинамические исследования, анализ нефтяных скважин, априорная информация, горизонтальные скважины, нефтяные пласты.

**Введение**

Известно, что интерпретация кривой восстановления давления (КВД) вертикальных скважин существенно отличается от интерпретации горизонтальных скважин, где сложный пространственный поток частиц жидкости сведен в определенные моменты времени к плоским фильтрационным потокам, представленным соответствующими уравнениями [1–3]. Так, например, радиальный поток горизонтальной скважины представлен уравнением забойного давления  $P_3(t)$  вида

$$\Delta P_3(t) = P_3(t) - P_3(t_0) = \frac{C_s q \mu B}{k_{xy} L} \ln \left( \frac{2,25 k_{xy} t}{m \mu r_{np}^2} \right), \quad (1)$$

а время его начала  $t_r$  определяется по формуле

$$t_r = 1800 d^2 m \mu C / k_z, \quad (2)$$

где  $P_3(t_0)$  – забойное давление в момент остановки скважины;  $k_r = \sqrt{k_z k_y}$  – радиальная проницаемость;  $k_z, k_y$  – вертикальные и горизонтальные проницаемости;  $q$  – дебит скважины перед ее остановкой,  $\mu B$  – вязкость и объемный коэффициент нефти со-

ответственно;  $m$  – пористость;  $r_{пр}$  – приведенный радиус скважины;  $L$  – длина горизонтальной части ствола скважины;  $d$  – расстояние от горизонтального ствола скважины до ближайшей границы нефтяного пласта;  $C$  – общая сжимаемость системы нефти и скелета породы;  $C_s$  – константа, зависящая от используемой системы единиц, например, в системе СИ  $C_s=9,205$ .

Линейный поток горизонтальной скважины представлен уравнением

$$\Delta P_3 = \frac{C_s q B}{\sqrt{\pi L h}} \sqrt{\frac{\mu t}{m k_y}} + \frac{q \mu}{4 \pi k_y L} S \quad (3)$$

с временем его начала

$$t_l = 160 L^2 m \mu C / k_y, \quad (4)$$

где  $k_y$  – горизонтальная проницаемость;  $S$  – скин-фактор скважины при линейной геометрии потока.

Следует отметить, что на практике при исследовании скважин по КВД используются преимущественно эти два потока для сокращения времени простоя скважин.

Особенность интерпретации горизонтальных скважин с использованием аналитических моделей КВД заключается в выделении на КВД типа потока и решении обратной задачи идентификации по определению фильтрационных параметров пласта и скважины с использованием моделей (1), (3).

Рассмотрим два часто используемых способа выделения потоков. Первый, аналитический способ, заключается в определении времени начала потока по приведенным в (2) и (4) формулам. Второй, часто используемый на практике графо-аналитический способ, основан на качественном критерии анализа производной от забойного давления  $P'_3(t) = dP_3(t)/dt$  в координатах  $\lg P'_3(t) - \lg(t)$  [1, 4, 5].

Для пояснения проблемы выделения потоков с использованием производной от забойного давления на рис. 1, 2 приведены значения забойных давлений и их производные в координатах  $\lg P'_3(t) - \lg(t)$  для горизонтальных скважин однородно-пористого пласта нефтяного месторождения Тюменской области.

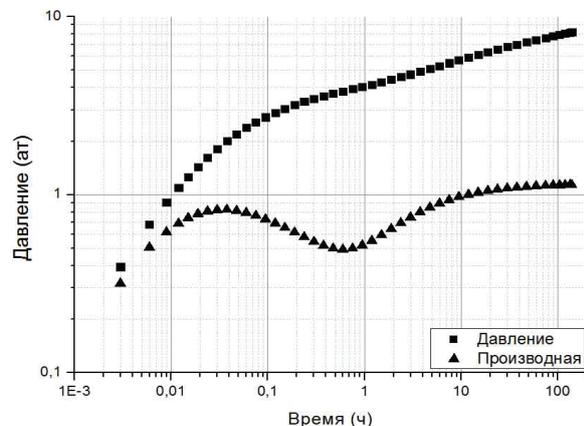


Рис. 1. Кривая восстановления давления и ее производная горизонтальной скважины № 2031

На рис. 1 для скважины № 2031 достаточно четко виден прямолинейный участок, представляющий радиальный поток, начало и конец горизонтального участка, определяющий линейный поток с наклоном производной забойного давления порядка 45 градусов, что позволяет корректно применить известные методы интерпретации с использованием моделей забойного давления (1), (3) [1–3]. На рис. 2 для скважины № 1434 наблюдается иная ситуация, показывающая, что четко выделить радиальный и линейный потоков не представляется возможным, и возникает необходимость использования количественных критериев.

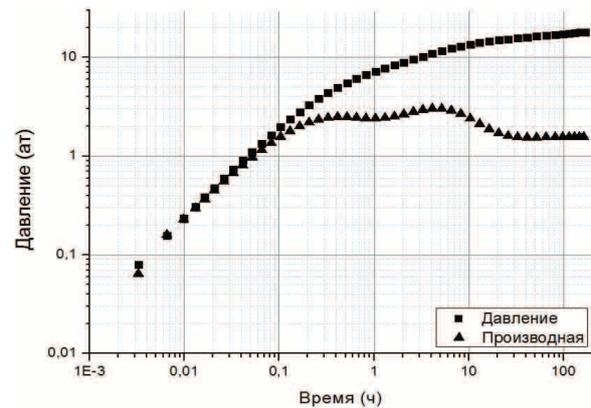


Рис. 2. Кривая восстановления давления и ее производная горизонтальной скважины № 1434

Однако проблемным моментом при использовании аналитической оценки времени начала потоков является присутствие в соответствующих формулах (2), (4) фильтрационных параметров пласта, вертикальной и горизонтальной проницаемости  $k_v$ ,  $k_y$ , которые нам изначально неизвестны и подлежат определению.

Для решения указанных выше задач определения времени начала потоков в работе предлагается и исследуется метод адаптивной интерпретации КВД, позволяющий диагностировать потоки в процессе проведения гидродинамических исследований горизонтальных скважин с одновременной оценкой фильтрационных параметров пласта.

### Диагностика потоков по методу адаптивной интерпретации

Основу метода диагностики потоков представляет критерий вида

$$\Delta t^* = \arg \min_{\Delta t} J(P_{t,3}^* - P_3(\alpha_t^*(\beta_t^*))), \quad (5)$$

$$\Delta t = [t + \tau] \in [t_0, t_n],$$

где запись  $\arg \min_x f(x)$  означает точку минимума  $x^*$  функции  $f(x)$  ( $f(x^*) = \min_x f(x)$ );  $J$  – показатель качества заданный в виде известной функции (либо функционала) от фактических значений забойного  $P_{t,3}^*$  и значений забойного давления, вычисленных на основе модели  $P_3(\alpha_t^*(\beta_t^*))$  на текущем интервале обработки КВД  $\Delta t$  длительностью  $\tau$ ,  $t_0$ ,  $t_n$  – время начала и завершения исследований;  $\Delta t^*$  – интервал

обработки КВД, на котором показатель  $J$  принимает наименьшее значение.

Оценки параметров модели забойного давления  $\alpha_i^*(\beta_i^*)$  – потоков (1), (3), получены в (5) в момент времени  $t^* = \Delta t^* - \tau$  на основе метода адаптивной интерпретации КВД путем решения оптимизационных задач [6]

$$\alpha_i^*(\beta_i) = \arg \min_{\alpha_i} \Phi(\alpha_i, \beta_i), \quad (6)$$

$$\beta_i^* = \arg \min_{\beta_i} J_0(\alpha_i^*, \beta_i), \quad (7)$$

где  $\Phi(\alpha_n, \beta_n)$  – комбинированный показатель качества интегрированной системы моделей КВД вида [7]

$$\begin{cases} P_{3,t}^* = F_0 \alpha_i + \xi_t, \\ \bar{Z}_t = F_a \alpha_i + \eta_t, t \in [t_0, t_n - \tau] \end{cases} \quad (8)$$

на текущем интервале обработки  $\Delta t$ ,  $P_{3,t}^*$ ,  $F_0 \alpha_i$  – векторы фактических забойных давлений и забойных давлений, вычисленных на основе модели КВД (1), (3), заданной с точностью до параметров  $\alpha_i = (\alpha_{1t}, \alpha_{2t})$ ;  $\bar{Z}_t$ ,  $F_a \alpha_i$  – векторы экспертных оценок параметров пласта  $\bar{Z}_t$  и полученные на основе модели  $F_a \alpha_i$ ;  $\beta_i^* = (\beta_{1t}^*, \beta_{2t}^*, \beta_{mt}^*)$  – оценка вектора управляющих параметров определяющих значимость (вес) экспертных оценок  $Z_t = (\bar{z}_{1t}, \bar{z}_{2t}, \bar{z}_{mt})$ ;  $F_0$ ,  $F_a$  – матрицы. Например, для модели забойного давления радиального потока (1)

$$\begin{aligned} \Delta P_s(t) = \alpha_1 + \alpha_2 \ln(t), \quad \alpha_1 = \frac{C_s q \mu B}{k_{xy} L} \ln \left( \frac{2,25 k_{xy}}{m \mu r_{np}^2} \right), \\ \alpha_2 = \frac{C_s q \mu B}{k_{xy} L} \end{aligned} \quad (9)$$

и модели экспертных оценок вида

$$\begin{aligned} \bar{z}_{1t} = \bar{\alpha}_{1t} = \alpha_{1t} + \eta_{1t}, \quad \bar{z}_{2t} = \bar{\alpha}_{2t} = \alpha_{2t} + \eta_{2t}, \\ \bar{\alpha}_{1t} = \frac{C_s q \mu B}{k_{xy} L} \ln \left( \frac{2,25 k_{xy}}{m \mu r_{np}^2} \right), \quad \bar{\alpha}_{2t} = \frac{C_s q \mu B}{k_{xy} L} \end{aligned} \quad (10)$$

матрица  $F_0$  размерности  $(2 \times nk)$  и матрица  $F_a$  размерности  $(2 \times 2)$  имеют вид

$$F_0 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}_{2, nk}, \quad F_a = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_{2, 2},$$

где  $nk$  – число измерений забойного давления в текущем интервале обработки  $\Delta t = t + \tau$  (5);  $x_i = \ln(t_i)$ ,  $i = 1, nk$ ;  $k_{xy}$ ,  $r_{np}^2$  – экспертные оценки радиальной проницаемости и приведенного радиуса скважины.

Момент начала радиального потока согласно (5) определяем по формуле

$$t_r^* = \Delta t_r^* - \tau, \quad (11)$$

где  $t_r^*$  – время начала текущего интервала обработки, на котором показатель качества  $J$  (3) принимает наименьшее значение.

Следует отметить, что возможна и другая форма диагностического критерия (5) для определения времени начала радиального потока вида

$$t_r^* = \arg \min_t \left| \frac{\partial \alpha_{2t}^*(\beta_i^*)}{\partial t} \right|, t \in [t_0, t_n - \tau]. \quad (12)$$

За момент времени начало потока принимается  $t = t_r^*$ , при котором абсолютная величина производной оценки параметра модели КВД  $\alpha_{2t}^*(\beta_i^*)$  принимает минимальное значение. Обоснованность использования критерия (12) подтверждается фактом стабилизации оценок КВД, полученных методом адаптивной интерпретации при выходе на соответствующий режим течения [6] (рис. 4, линия 3). Оценка радиальной проницаемости  $k_{xy,t}^*$  согласно (9) и (12) определяется по формуле

$$k_{xy,t}^* = \frac{C_s q \mu B}{\alpha_{2t}^*(\beta_i^*) L}, \quad \text{при } t = t_r^*. \quad (13)$$

Аналогично (13) в силу линейности по параметрам уравнений забойного давления (3) имеет место оценка горизонтальной проницаемости вида

$$k_{y,t}^* = \frac{(C_s q B)^2 \mu}{(Lh)^2 \pi m \alpha_{2t}^*(\beta_i^*)}, \quad \text{при } t = t_r^*, \quad (14)$$

где  $t_r^*$  определяется по формуле (12).

Часто на КВД горизонтальных скважин наблюдается ранний и поздний радиальный потоки, представленные одним уравнением забойного давления (1) и слабо проявляющиеся на диагностическом графике (рис. 2). В этой связи целесообразным является использование диагностического критерия

$$t^* = \arg \max_t \left| \frac{\partial^2 \alpha_{2t}^*(\beta_i^*)}{\partial t^2} \right|, t \in [t_0, t_n - \tau]. \quad (15)$$

Здесь за момент времени начало потока  $t^*$  принимает то значение времени исследований, при котором абсолютная величина второй производной оценки параметра КВД  $\alpha_{2t}^*(\beta_i^*)$  принимает максимальное значение, что фактически приводит к резкому «всплеску» абсолютной величины второй производной оценки  $\alpha_{2t}^*(\beta_i^*)$  (рис. 6, 8, линия 3).

### Результаты интерпретации КВД с диагностикой потоков

Результаты интерпретации КВД и диагностики потоков горизонтальных скважин № 1434 и 2031 нефтяного пласта месторождения Тюменской области приведены на рис. 3–6 и в табл. 1, 2. В качестве моделей КВД использовалось уравнение (1) и (3). Комбинированный показатель качества  $\Phi$ , интегрированной системы моделей КВД

$$\begin{cases} \Delta P_{3,t}^* = F_t \alpha_i + \xi_t, \\ \bar{\alpha}_{2,t} = \alpha_{2t} + \eta_t, t \in [t_0, t_k - \tau] \end{cases} \quad (16)$$

был выбран в виде суммы частных квадратичных показателей качества

$$\Phi_t = (J_{0,t} = \|\Delta P_{3,t}^* - F_t \alpha_t\|_{W_t}^2) + \beta_t (\bar{\alpha}_{2,t} - \alpha_{2,t})^2, \quad (17)$$

где экспертная оценка  $\bar{\alpha}_{2,t}$  для радиального притока определялась из (10), а для линейного потока выбиралась равной

$$\bar{\alpha}_{2,t} = \frac{C_s q B}{\sqrt{\pi} L h} \sqrt{\frac{\mu}{m k_y}}$$

Оценки радиальной  $k_{zy,t}^*$  и горизонтальной  $k_{y,t}^*$  проницаемости рассчитывались по формулам

$$k_{zy,t}^* = \frac{C_s q \mu B}{\alpha_{2,t}^* (\beta_t^*) L}, \quad \text{при } t = t_r^*,$$

$$k_{y,t}^* = \frac{(C_s q B)^2 \mu}{(Lh)^2 \pi m \alpha_{2,t}^* (\beta_t^*)}, \quad \text{при } t = t_l^*, \quad (18)$$

где приближение параметра  $\alpha_{2,t}^* (\beta_t)$  моделей КВД (1) и (3) определялось из решения системы линейных алгебраических уравнений методом Гаусса [8]

$$(F_t^T W_t F_t + \beta_t I) \cdot \alpha_t (\beta_t) = (F_t^T W_t + \beta_t \bar{\alpha}_{2,t}), \quad (19)$$

в которой матрица  $F_t$  формировалась согласно (10) для радиального потока и при  $x_i = \sqrt{t_i}$  для линейного потока;  $W_t = \text{diag}(w(t), t=1, n_k)$  – диагональная матрица весовых функций  $w(t)$  – определяет вес забойных давлений  $\Delta P_{3,t}^*$  в текущий момент времени  $t$  на участке обработки  $\Delta t = t + \tau$  с числом точек забойного давления  $\Delta P_{3,i}^*, i=1, n_k (n_k=5)$ .

Оценки управляющего параметра определялись путем решения оптимизационной задачи (7) с использованием квадратичного показателя качества

$$J = \|\Delta P_{3,t}^* - F_t \alpha_t^* (\beta_t)\|^2$$

методом золотого сечения [9].

На рис. 3 приведены фактические (линия 1) и восстановленные значения забойного давления (линии 2-4) на основе адаптивного метода наилучшего совмещения (АМНС), который следует из (19) при  $\beta_t=0$ , адаптивного метода наилучшего совмещения с регуляризацией (АМНСР), следующего из (18) при  $\bar{\alpha}_{2,t}=0$ , и адаптивного метода интегрированных моделей (АМИМ) (19). Экспертные оценки радиальной и горизонтальной проницаемости для скважины № 1434 в начальный момент времени  $t=t_0$  выбирались равными  $\bar{k}_{xy} = \bar{k}_y = 100$  мД, а для скважины № 2031  $\bar{k}_{xy} = \bar{k}_y = 1000$  мД с последующим их уточнением

$$\bar{k}_{zy,t} = \frac{C_s q \mu B}{\alpha_{2,t}^* (\beta_t^*) L}, \quad \text{при } t > t_0,$$

$$\bar{k}_{y,t} = \frac{(C_s q B)^2 \mu}{(Lh)^2 \pi m \alpha_{2,t}^* (\beta_t^*)}, \quad \text{при } t > t_0.$$

Из рис. 1 видно, что модель КВД, полученная АМИМ, более точно воспроизводит фактические значения забойного давления по сравнению с моделями, полученными АМНС и АМНСР.

На рис. 4-6 приведены оценки радиальной проницаемости (18) ее первой и второй производ-

ных, полученные АМНС, АМНСР и АМИМ соответственно.

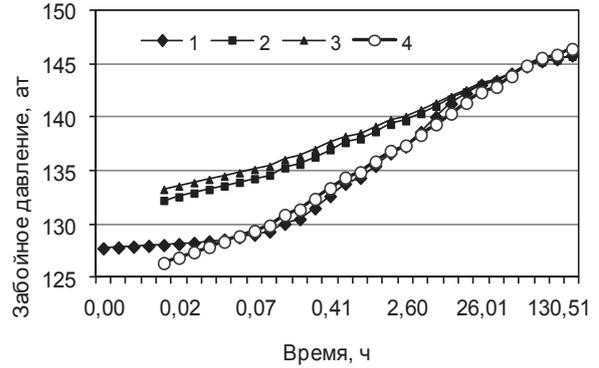


Рис. 3. Фактические (линия 1) и восстановленные значения забойного давления скважины № 1434

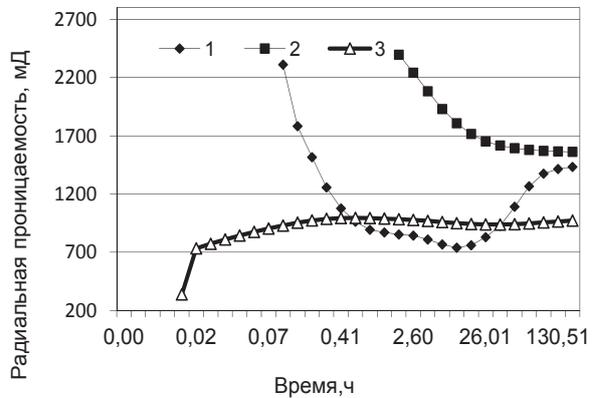


Рис. 4. Оценки радиальной проницаемости скважины № 1434. 1) АМНС; 2) АМНСР; 3) АМИМ

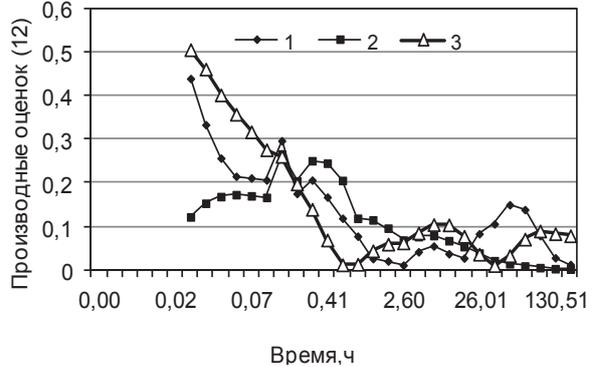


Рис. 5. Производные оценок радиальной проницаемости скважины № 1434 по критерию (12). 1) АМНС; 2) АМНСР; 3) АМИМ

Из рис. 4 видно, что начиная с определенного момента времени наступает стабилизация оценок радиальной проницаемости и возникает вопрос об определении времени начала радиального притока для выбора подходящей оценки. Ответ на этот вопрос получен с использованием критериев (12) и (15), где первые и вторые производные радиальной проницаемости, изображенные на рис. 5 и 6 соответственно, дважды принимают минимальные и максимальные значения и фактически определяют момент времени начала раннего и позднего ра-

диальных потоков. Конкретные оптимальные значения времени начала этих притоков приведены в табл. 2.

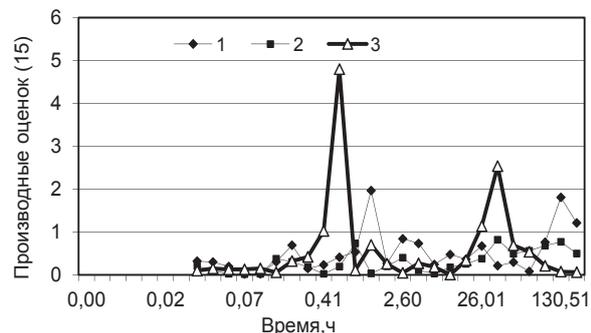


Рис. 6. Вторые производные оценок радиальной проницаемости скважины № 1434 по критерию (15). 1) AMHCP; 2) AMHC; 3) AMIM

Следует отметить, что выделить ранний и поздний радиальные потоки по критериям (12) и (15) для скважины № 1434 при использовании AMHC и AMHCP не представлялось возможным.

На рис. 7, 8 для скважины № 2031 приведены абсолютные значения оценок первой (12) и второй (15) производных параметра  $\alpha_{2i}(\beta_i)$  модели КВД (1), полученные AMHC, AMHCP и AMIM соответственно.

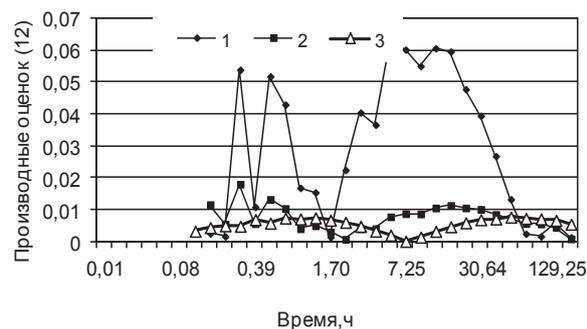


Рис. 7. Производные оценок радиальной проницаемости скважины № 2031 по критерию (12). 1) AMHCP; 2) AMHC; 3) AMIM

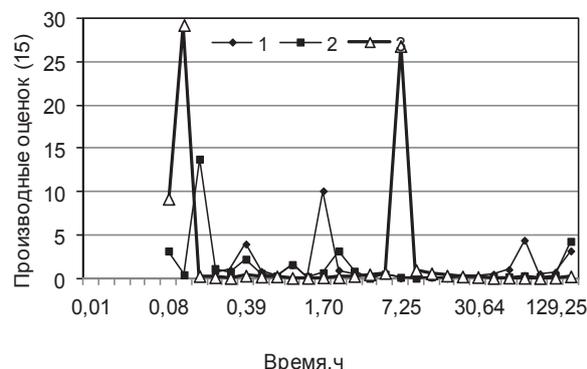


Рис. 8. Вторые производные оценок радиальной проницаемости скважины № 2031 по критерию (15). 1) AMHCP; 2) AMHC; 3) AMIM

Из рис. 7, 8 видно, что AMIM с использованием критериев (12) и (15) позволяет диагностировать время начала раннего и позднего радиального

потоков. Конкретные оптимальные значения времени начала этих потоков приведены в табл. 2.

В табл. 1, 2 приведены результаты сравнительного анализа оценок радиальной и горизонтально проницаемостей и времени начала потоков, полученные при интерпретации горизонтальных скважин № 2031 и 1434 с использованием зарубежного программного комплекса Saphir, аналитического метода по формулам (2), (4) и AMHC, AMHCP и AMIM.

Из табл. 1 видно, что оценки проницаемости нефтяного пласта при интерпретации КВД скважин № 2031 с использованием AMIM с диагностикой потоков по критериям (12) и (15) согласуются с оценками, полученными с использованием программного комплекса Saphir. Для скважины № 1434 оценки проницаемости, полученные AMIM, больше согласуются с AMHCP и AMIM.

Преимущество AMIM заключается в том, что он дает возможность определять время начала потоков в случае, когда использование аналитического (по формулам (2), (4)) и графоаналитического методов (рис. 2) вызывает значительные трудности.

Таблица 1. Результаты интерпретации скважин № 2031 и 1434

Номер скважины	Метод интерпретации	Оценки проницаемости, мД		
		Ранней радиальной	Поздней радиальной	Линейной
2031	Saphir	-	3130	3742
	AMHC	3161	3767	3341
	AMHCP	2984	3087	3098
	AMIM	2849	3065	2803
1434	Saphir	-	214	110
	AMHC	842	1414	-
	AMHCP	-	1594	-
	AMIM	995	937	237

Таблица 2. Результаты диагностики радиального и линейного потоков скважин № 2031 и 1434

Номер скважины	Метод диагностики потоков	Время начала потоков, ч		
		Раннего радиального	Позднего радиального	Линейного
2031	Аналитический	-	1,5	3,17
	AMHC	0,21	1,7	2,28
	AMHCP	0,21	2,28	3,05
	AMIM	0,11	7,25	9,58
1434	Аналитический	-	0,75	1,89
	AMHC	2,60	130,51	-
	AMHCP	-	51,90	-
	AMIM	0,65	32,75	51,90

### Выводы

1. Предложен адаптивный метод диагностики радиального и линейного потоков с одновременной оценкой фильтрационных параметров нефтяного пласта в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин по кривой восстановления забойного давления.
2. На примере интерпретации кривой восстановления давления двух горизонтальных сква-

жин однородно-пористого нефтяного пласта показано, что метод адаптивной интерпретации с диагностикой потоков дает возможность определять время начала радиального и линейного потоков в условиях, когда выделения потоков аналитическим способом и методом анализа

производной забойного давления вызывает значительные трудности.

3. Учет и корректировка экспертных оценок проницаемости нефтяного пласта позволяет повысить надежность определения времени начала радиального и линейного потоков горизонтальных скважин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шагиев Р.Г. Исследование скважин по КВД. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
2. Иктисанов В.А. Определение фильтрационных параметров пластов и реологических свойств дисперсных систем при разработке нефтяных месторождений. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2001. – 212 с.
3. Joshi S.D. Horizontal well technology. – Oklahoma: PenWell publ. comp., 1991. – 381 p.
4. Butler J.M. Horizontal wells for the recovery of oil, gas and bitumen. – Westmount: Petroleum Society Monograph, 1997. – 224 p.
5. Bourdet D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. Use of pressure derivative in well test interpretation // SPE. – 1984. – № 12777. – 293–302 p.

6. Гаврилов К.С., Сергеев В.Л. Адаптивная интерпретация нестационарных гидродинамических исследований скважин в системе «пласт–скважина» методом интегрированных моделей // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 72–75.
7. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 198 с.
8. Воеводин В.В. Вычислительные методы линейной алгебры. – М.: Наука, 1977. – 304 с.
9. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.

Поступила 03.06.2013 г.

UDC 519.688:622.276.5.001.42

## ADAPTIVE INTERPRETATION OF PRESSURE RECOVERY CURVE OF HORIZONTAL WELLS WITH DIAGNOSTIC FLOW

E.V. Romanova, V.L. Sergeev

Tomsk Polytechnic University

**Relevance of the work** is connected with the need for flow diagnostic at adaptive interpretation of unsteady hydrodynamic studies of horizontal wells using analytical models of pressure recovery curve.

**The main aim of the study:** to develop a method of adaptive interpretation of the pressure recovery curve which allows diagnosing streams at hydrodynamic studies of horizontal wells with simultaneous evaluation of reservoir filtration characteristics.

**The methods used in the study:** the theoretical and practical developments in the field of well testing, system analysis, system identification in light of additional prior information, optimization of functions and linear algebra were used. Solution of the problems of flow diagnosing, pressure recovery curve identification and interpretation has carried out on the basis of production data of downhole pressure in the well with the filter expert estimates of formation parameters using a computer program Saphir.

**The results.** The authors have developed the adaptive method for interpreting the pressure recovery curve with the diagnosis of radial and linear flow with simultaneous assessment of filtration parameters of the oil reservoir at hydrodynamic researches of horizontal wells. By the example of processing the results of flow testing by the pressure recovery curve of two horizontal wells of uniform-porous oil reservoir it was shown that the adaptive method allows increasing the reliability of determining the time of radial and linear flow starts.

#### Key words:

Interpretation, diagnostics, hydrodynamic tests, analysis of oil wells, a-priori information, horizontal wells, oil pools.

#### REFERENCES

1. Shagiev R.G. *Issledovanie skvazhin po KVD* [Well surveying by pressure build-up]. Moscow, Nauka, 1998. 304 p.
2. Iktisanov V.A. *Opredelenie filtratsionnykh parametrov plastov i reologicheskikh svoystv dispersnykh sistem pri razrabotke neftyanykh mestorozhdeniy* [Determination of reservoir filtration parameters and dispersed system rheological properties when developing oil fields]. Moscow, BNII OENG Publ., 2001. 212 p.
3. Joshi S.D. *Horizontal well technology*. Oklahoma, PenWell Publ.comp., 1991. 381 p.
4. Butler J.M. *Horizontal wells for the recovery of oil, gas and bitumen*. Westmount, Petroleum Society Monograph, 1997. 224 p.
5. Bourdet D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. Use of pressure derivative in well test interpretation. *SPE*, 1984, no. 12777, 293–302 p.

6. Gavrilov K.S., Sergeev V.L. Adaptivnaya interpretatsiya nestatsionarnykh gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhyn v sisteme «plast–skvazhyna» metodom integrirovannykh modeley [Adaptive interpretation of transient well test in the «layer–well» method of integrated models]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 72–75.
7. Sergeev V.L. *Integrirovannyye sistemy identifikatsii* [Integrated Systems of Identification]. Tomsk, TPU Publ. House, 2011. 198 p.
8. Voevodin V.V. *Vychislitelnye metody lineynoy algebrы* [Computational methods of linear algebra]. Moscow, Nauka, 1977. 304 p.
9. Pantelev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in the examples and problems]. Moscow, Vyshaya shkola, 2002. 544 p.

УДК 004.81

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИИ ГИБРИДНЫХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

М.П. Силич\*, В.А. Силич, С.В. Аксенов

Томский политехнический университет

\*Томский университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: smp@muma.tusur.ru

**Актуальность работы** обусловлена нерешенной проблемой анализа ситуации в сфере энергосбережения территориальных образований в условиях неполноты исходных данных и неоднозначности их интерпретации. Целью работы является разработка когнитивного подхода к анализу состояния энергетической эффективности в территориальных образованиях различного уровня, позволяющего не только оценить уровень энергоэффективности, но и проанализировать причины сложившейся ситуации и определить основные направления проведения энергосберегающей политики. В работе используются методы построения нечетких когнитивных карт; методы нечеткой оценки и нечеткого продукционного вывода; методы кластеризации.

**Результаты:** представлена структура гибридной когнитивной карты; описано построение иерархии когнитивных карт; предложен кейсовый подход к анализу когнитивных карт; рассмотрены методы оценки факторов в различных ситуациях.

**Выводы.** Использование иерархических гибридных когнитивных карт дает следующие преимущества: возможность детального рассмотрения отдельных подсистем; повышение обоснованности выбора индикаторов; сочетание различных способов оценивания факторов; учет внешних особенностей территориальных образований. Результаты анализа могут быть представлены в виде дерева причин, демонстрирующего причинно-следственные цепочки между состояниями различных факторов.

### Ключевые слова:

Энергетическая эффективность, территориальные образования, гибридная когнитивная карта, нечеткая оценка факторов.

Традиционный подход к оценке состояния энергетической эффективности и энергосбережения на территории региона состоит в определении уровня энергоэффективности отдельных территориальных образований (например, субъектов федерального округа или муниципальных районов в рамках отдельного субъекта Федерации) на основе значений индикаторов. При этом значения индикаторов сравниваются с усредненными показателями по группе территориальных образований (ТО) или с некоторыми нормативными значениями и используются для вычисления интегральных оценок, как правило, на основе аддитивной свертки. Для учета влияния внешних факторов – природно-климатических, географических, социально-экономических, инфраструктурных и т. д. – ряд авторов предлагает осуществлять типологическую группировку территорий по признакам, влияющим на энергосбережение [1, 2].

Индикативный подход позволяет классифицировать территориальные образования по уровням энергетической эффективности или составить рейтинг ТО, однако он не объясняет причины ситуации, сложившейся на той или иной территории, не дает «полной картины». Для понимания ситуации необходимо учитывать, что одни индикаторы характеризуют созданные условия для реализации потенциала энергосбережения, другие – внешние условия, влияющие на освоение потенциала, третьи – достигнутый уровень энергоэффективности. Кроме того, не всегда индикаторы могут быть однозначно интерпретированы, границы уровней оценки зачастую «размыты», некоторые факторы вообще можно оценить лишь косвенно и весьма приблизительно. В силу этих причин для анализа сферы энергосбережения территориальных обра-

зований, на наш взгляд, целесообразно использование нечетких когнитивных карт, что даст возможность оценить текущее состояние в условиях неполноты исходных данных и неоднозначности их интерпретации, а также сформировать выводы в терминах естественного языка относительно причин сложившейся ситуации.

В настоящее время разработано множество методов когнитивного моделирования – традиционные знаковые когнитивные карты, «нечеткие» когнитивные карты Коско, нечеткие карты Силова, нечеткие продукционные когнитивные карты, нечеткие реляционные карты [3]. Выбор метода зависит от задачи исследования, особенностей моделируемой предметной области, глубины знаний экспертов, наличия данных. Рассмотрим требования, которые предъявляет задача анализа состояния энергетической эффективности территориальных образований.

Прежде всего, необходимо отметить сложность исследуемой предметной области, включающей множество аспектов, связанных с различными видами топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), с различными стадиями производства и потребления энергии, с различными сферами энергопотребления (промышленность, жилищный комплекс, коммунальное хозяйство, транспорт). Таким образом, чтобы когнитивная модель была обозримой, необходимо сформировать множество взаимосвязанных карт, соответствующих отдельным подсистемам. Каждая карта должна включать как целевые факторы, отражающие интегрированные оценки состояния системы (подсистемы), так и управляемые, на которые можно непосредственно воздействовать, а также внешние, описывающие социально-экономические, инфраструктурные,

природно-географические особенности территориальных образований.

Проблема выбора концептов осложняется тем, что один и тот же фактор может оцениваться на основе множества индикаторов, которые дополняют или заменяют друг друга. Логично явно выделить концепты-факторы, оцениваемые на качественном уровне, и концепты-индикаторы с четкими числовыми значениями, используемые для оценки факторов. Еще одна проблема связана с тем, что одни и те же значения индикаторов по-разному интерпретируются для территорий с разными внешними условиями. Можно использовать подход типологической группировки территориальных образований. В этом случае для каждой группы (кластера) строится свой набор функций принадлежности для оценки факторов по индикаторам.

Поскольку не все факторы могут быть непосредственно оценены по индикаторам, необходимо предусмотреть возможность их косвенной оценки по другим факторам (влияющим и/или зависящим). Форма представления знания экспертов о взаимовлиянии факторов может быть различной: в одних случаях эксперты могут сформулировать правила, в других случаях они могут лишь оценить силу влияния факторов друг на друга и т. д.

Существующие методы когнитивного моделирования не позволяют в полной мере учесть перечисленные особенности рассматриваемой предметной области. Данная работа посвящена разработке метода построения и анализа гибридных когнитивных карт, который позволял бы: строить совокупность иерархически связанных когнитивных карт; рассматривать концепты с четкими и нечеткими значениями; выводить оценки факторов энергоэффективности с учетом особенностей различных территориальных образований; сочетать различные способы оценивания факторов; формировать дерево причин.

Гибридная когнитивная карта (ГКК) представляет собой граф, вершинами которого являются концепты двух видов: факторы и индикаторы. Формально ГКК можно задать в виде:

$$G = \langle F, E, R^{FF}, R^{FE}, P, R^{FP} \rangle,$$

где  $F$  – множество факторов;  $E$  – множество индикаторов;  $R^{FF} \subset F \times F$  – множество причинно-следственных связей между факторами;  $R^{FE} \subset F \times E$  – множество связей ассоциации между факторами и индикаторами;  $P$  – множество процедур оценивания факторов (в том числе процедуры фаззификации, кластеризации, нечеткого вывода и др.);  $R^{FP}$  – множество отношений, связывающих факторы и процедуры.

Фактор – это некоторое свойство системы, оцениваемое на качественном уровне, например: «энергосберегающее поведение», «существенность расходов домохозяйств на электроэнергию», «информированность о существующих технологиях энергосбережения». Каждому фактору  $f_i \in F$  соответствует лингвистическая переменная, характе-

ризуемая терм-множеством  $T^i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}$ , термы которого представляют собой нечеткие оценки типовых состояний фактора, например «низкая», «средняя», «высокая».

Множество факторов включает в себя подмножества:  $F^C$  – целевые факторы, состояние которых позволяет оценить ситуацию в целом;  $F^U$  – управляемые факторы, состояние которых можно сознательно изменять;  $F^V$  – внешние возмущения, на состояние которых в рамках системы невозможно повлиять.

Индикатор – это измеримый показатель, характеризующий тот или иной фактор. Значения индикаторов определяются либо с помощью объективных измерений, либо вычисляются на основе исходных данных по формулам. Примеры индикаторов: «энергоёмкость валового муниципального продукта», «удельная величина потребления тепловой энергии в многоквартирных домах», «доля объема электрической энергии, расчеты за потребление которой осуществляются на основании показаний приборов учета».

Между фактором и индикатором может быть установлено отношение ассоциации  $R^{FE}: F \times E \rightarrow [0, 1]$ . Отношению  $f_i R^{FE} e_j$  сопоставляется коэффициент соответствия  $a_{ij}$  (число от 0 до 1). Чем выше значение коэффициента, тем точнее индикатор  $e_j$  характеризует фактор  $f_i$ . Фактор может быть связан с несколькими индикаторами. Например, эффективность потребления ТЭР в производственной сфере можно оценивать по показателям: «энергоёмкость заработной платы», «энергоёмкость рабочего места», «энергоёмкость совокупного объема отгруженной продукции», «энергоёмкость валовой добавленной стоимости».

Между факторами устанавливаются причинно-следственные отношения, которые будем называть отношениями влияния:  $R^{FF}: F \times F \rightarrow [-1, 1]$ . Отношению  $f_i R^{FF} f_j$  приписывается вес  $w_{ij}$ , характеризующий как направление влияния (положительное или отрицательное), так и силу влияния. Для оценки силы влияния  $|w_{ij}|$  можно использовать следующую шкалу: 0,1 – очень слабое влияние; 0,3 – слабое влияние; 0,5 – существенное; 0,7 – сильное; 0,9 – очень сильное (0,2, 0,4, 0,6, 0,8 – промежуточные значения). Сила влияния может являться не только константой, но и переменной, принимающей разные значения для разных территориальных образований. Например, сила влияния фактора, характеризующего уровень потребления тепловой энергии, на фактор, отражающий интегральный уровень потребления ТЭР, зависит от доли тепловой энергии в суммарном энергопотреблении, которая не одинакова для разных ТО и может изменяться с течением времени. Сумма степеней влияния нескольких факторов на один и тот же фактор не обязательно должна составлять единицу, поскольку могут существовать и неучтенные, пока еще не выявленные влияющие факторы.

Сеть взаимовлияний факторов представляет собой дерево (совокупность деревьев). Корнем дерева

является целевой фактор, листьями – «внешние» или управляемые факторы. Отношения влияния позволяют выявить причины достигнутого уровня того или иного фактора и оценить важность той или иной причины. Если влияющих факторов много, они могут быть вынесены на поддиаграммы – когнитивные карты нижнего уровня. Фактор, к которому «прикреплена» дочерняя карта, становится целевым на этой карте (корнем дерева). Назовем такой фактор портовым узлом. В свою очередь, к некоторым факторам на дочерней карте также могут быть прикреплены карты нижнего уровня. Таким образом, формируется иерархия когнитивных карт:  $\{G_i, R^i\}$ .

Будем говорить, что карта  $G_1$  доминирует над  $G_2(G_1, R^1 G_2)$ , если:

$$\exists f^p \mid f^p \in F_1, f^p \in F_2, f^p \notin F_1^C, f^p \in F_2^C \},$$

где  $F_1, F_2$  – соответственно множества факторов карты  $G_1$  и  $G_2$ ,  $F_1^C, F_2^C$  – подмножества целевых факторов карт  $G_1$  и  $G_2$ ;  $f^p$  – портовый узел.

Иерархический подход позволяет не только уменьшить размеры карт и сделать их более наглядными, но и выделить подсистемы, описывающие отдельные аспекты исследуемой системы, и связать их посредством портовых узлов.

На рис. 1 приведен пример гибридной карты для задачи анализа эффективности потребления электроэнергии в жилищном фонде муниципального образования. Факторы изображены в виде эллипсов (внешние ограничения – в виде эллипсов с пунктирным контуром), индикаторы – в виде кружочка. Отношения ассоциации представлены отрезками пунктирной линии, отношения влияния между факторами – отрезками сплошной линии со стрелками. Коэффициенты соответствия и силы влияния отображаются в виде меток рядом с соответствующей дугой. Если к фактору присоединена поддиаграмма, то рядом с символом соответствующего фактора помещается специальная пиктограмма.

Анализ гибридной когнитивной карты позволяет дать оценку каждому фактору.

Имеется множество территориальных образований  $O=\{o_k\}$ , являющихся объектами оценивания. Каждое ТО характеризуется собственным набором значений индикаторов  $\{e_j^k\}$ . В результате анализа необходимо получить нечеткие оценки факторов  $\{f_i^k\}$ . Каждая оценка может быть представлена в виде:  $\langle T(a_{f_i^k}), \mu_{T(f_i^k)} \rangle$ .

Направление анализа карты вовсе не обязательно должно идти от терминальных факторов к

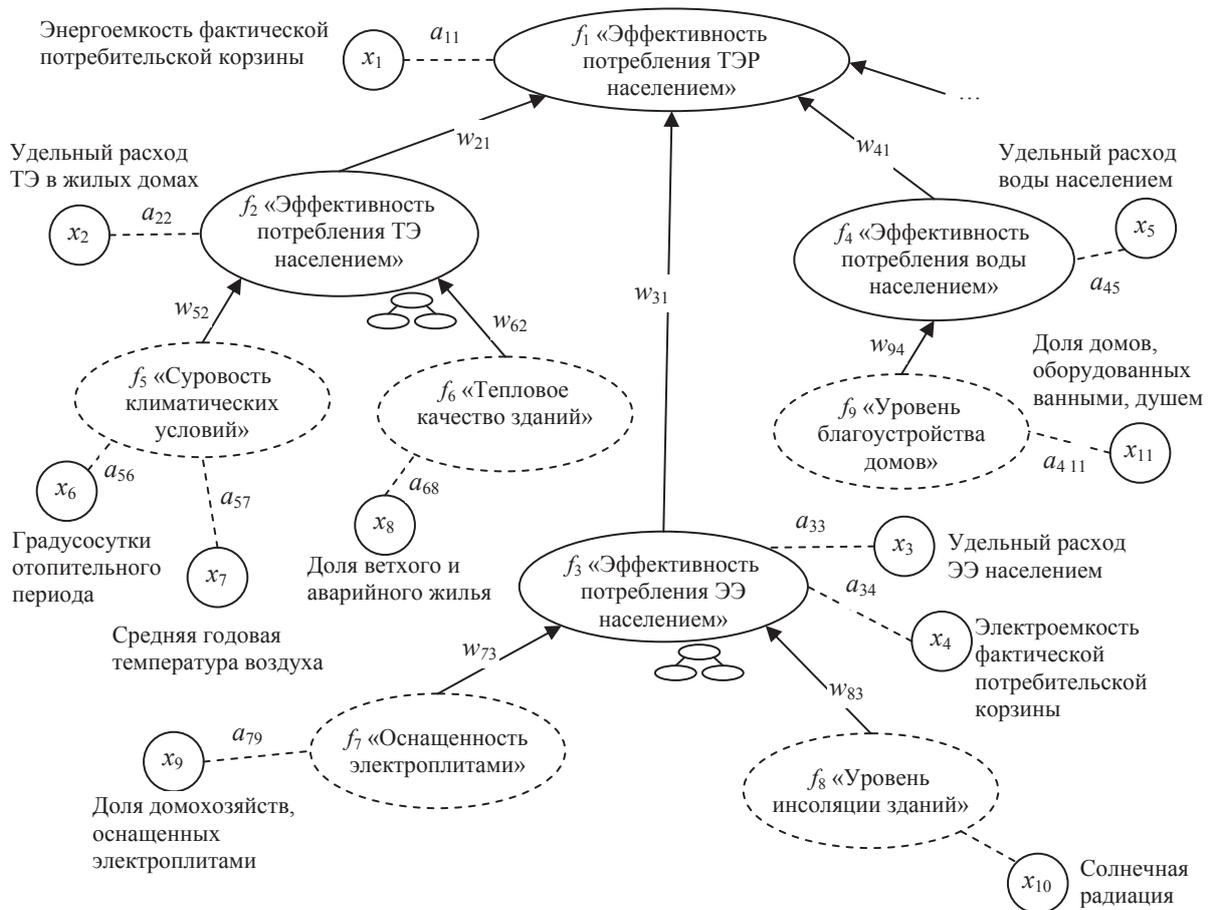


Рис. 1. Пример гибридной когнитивной карты

целевым. Если целевой фактор связан с индикатором, то его значение может быть получено непосредственно с помощью фаззификации значения индикатора. Этим же способом может быть получена оценка для любого фактора, имеющего ассоциированные с ним индикаторы. Причем при фаззификации может быть учтено влияние внешних факторов. Оценка факторов, для которых нет индикаторов или нет возможности получить соответствующие данные, выводится на основе оценок других факторов. Таким образом, выбор способа оценивания того или иного фактора осуществляется в зависимости от конкретной ситуации: связан ли фактор с индикаторами, влияют ли на него внешние факторы, известны ли оценки влияющих на него и/или зависимых от него факторов, в какой форме представлены знания экспертов о взаимовлиянии факторов и др. Такой подход можно назвать кейс-подходом (от англ. case – случай, прецедент). Для его применения необходимо разработать библиотеку процедур, из которой исследователь выбирает наиболее подходящие для каждой ситуации.

Все ситуации оценивания можно разделить на две основных группы: оценивание на основе значений индикаторов и косвенное оценивание на основе оценок других факторов. В рамках каждой группы также могут быть выделены подгруппы ситуаций. Рассмотрим некоторые кейсы – типовые ситуации оценивания.

Если оцениваемый фактор связан с одним или несколькими индикаторами, то его оценка может быть получена с помощью процедур фаззификации.

Чтобы оценить фактор  $f_i$  на основе индикатора  $e_j (f_i R^{FE} e_j)$ , для каждого термина строятся функции принадлежности на базовом множестве значений индикатора. Функции принадлежности (ФП) могут строиться разными способами: субъективным (функции строит эксперт), на основе равномерного разбиения базового множества по числу термов, на основе распределения примеров. На наш взгляд, предпочтительнее последний способ, когда функ-

ции строятся на основе распределения значений индикатора для всех сравниваемых территориальных образований.

Нечеткая оценка фактора получается путем фаззификации значений индикатора. Для учета коэффициента соответствия  $a_{ij}$  используется операция умножения:

$$\mu_{T(f_i^k)} = a_{ij} \mu_{T(e_j^k)},$$

где  $\mu_{T(e_j^k)}$  – значение ФП, полученное при фаззификации значения индикатора  $e_j^k$  без учета коэффициента соответствия.

Если фактор связан с несколькими индикаторами  $e_{j1}, \dots, e_{jm}$ , то для агрегирования оценок полученных путем фаззификации значений каждого индикатора можно использовать операцию алгебраического сложения:

$$\begin{aligned} \mu_{T(f_i^k)} &= \\ &= a_{j1} \mu_{T(e_{j1}^k)} + \dots + a_{jm} \mu_{T(e_{jm}^k)} - a_{j1} \mu_{T(e_{j1}^k)} \dots a_{jm} \mu_{T(e_{jm}^k)}. \end{aligned}$$

Схематично процедура агрегирования проиллюстрирована на рис. 2.

Рассмотрим ситуацию, когда на оцениваемый фактор  $f_{i1}$  влияет фактор  $f_{i2}$ , являющийся внешним ограничением ( $f_{i2} R^{FF} f_{i1}, f_{i2} \in F^V$ ). Это влияние целесообразно учитывать через параметры функций принадлежности. На множестве  $O$  выделяются кластеры  $TO$  с похожими внешними условиями, т. е. с одинаковыми значениями внешнего фактора  $f_{i2}$ . Функции принадлежности на множествах значений индикаторов, связанных с  $f_{i1}$ , строятся отдельно для каждого кластера.

Например, на фактор «уровень потребления тепловой энергии населением», ассоциированный с индикатором «удельный расход тепловой энергии на 1 м<sup>2</sup> общей жилой площади, Гкал/м<sup>2</sup>», влияет природно-климатический фактор «суровость климатических условий», определяющий объективную потребность в энергоресурсах. Очевидно, что чем севернее регион, тем потребление тепла выше и, следовательно, интерпретация значения индикатора потребления должна осуществляться по-

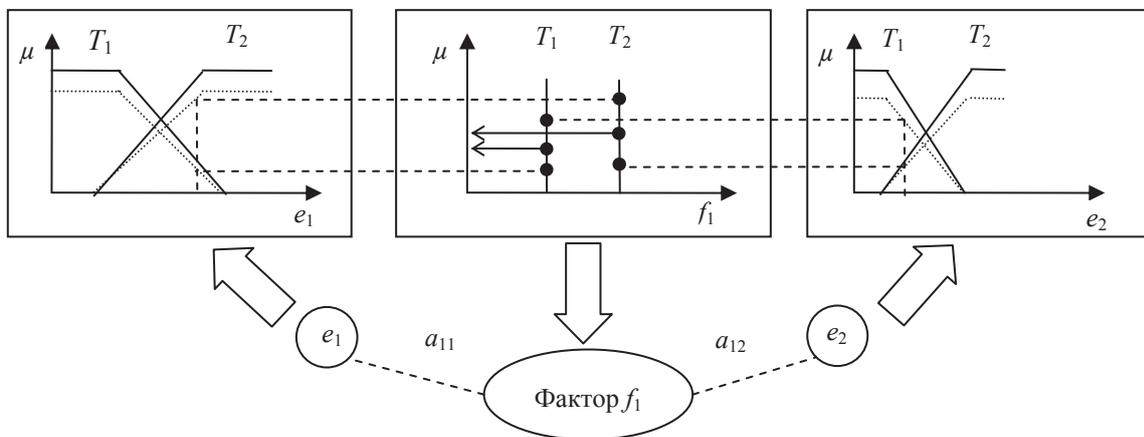


Рис. 2. Ситуация оценивания фактора по нескольким индикаторам

разному для северных, центральных и южных регионов.

При кластеризации по фактору  $f_{i2}$  признаками кластеризации выступают индикаторы  $e_j$ , связанные с этим фактором:  $f_{i2} R^{FE} e_j$ . Например, для фактора «суровость климатических условий» индикаторами выступают показатели «средняя годовая температура воздуха», «продолжительность отопительного периода», «градусосутки отопительного периода» и др.

Нечеткая кластеризация позволяет определить нечеткое покрытие:  $\tilde{Z}(O) = \{O_l | O_l \subseteq O\}$ ,  $l=1, L$ , которое задается матрицей  $\|\mu_{O_l}(o_k)\|$  значений функций принадлежности объектов  $o_k \in O$  нечетким кластерам  $O_l$ . Наименования кластеров  $O_l$  можно рассматривать как термы  $T^l$  лингвистической переменной, сопоставленной соответствующему внешнему фактору  $f_{i2}$ . Таким образом, можно для каждого объекта  $o_k$  задать значения внешнего фактора в виде:  $\langle T(f_{i2}^k), \mu_{T(f_{i2}^k)} \rangle$ , где  $\mu_{T(f_{i2}^k)} = \mu_{O_l}(o_k)$ .

Кластеризацию территориальных образований предлагается выполнять с помощью алгоритма Густафсона-Кесселя [4]. Пример использования данного алгоритма для кластеризации муниципальных образований Томской области по климатическим факторам при решении задачи оценки эффективности использования тепловой энергии в жилищном фонде приведен в [5].

Как уже указывалось, функции принадлежности для фактора  $f_{i1}$ , на который влияет внешний фактор  $f_{i2}$ , формируются отдельно для каждого кластера. После фаззификации по индикаторам, связанным с  $f_{i1}$ , степень уверенности в оценке корректируется с учетом степени принадлежности объекта к соответствующим кластерам:

$$\mu_{T^m(f_{i1}^k) | T^l(f_{i2}^k)} = \min\{\mu_{T^m(f_{i1}^k)}, \mu_{T^l(f_{i2}^k)}\},$$

где  $\mu_{T^m(f_{i1}^k) | T^l(f_{i2}^k)}$  – значение функции принадлежности к значению  $T^m$  фактора  $f_{i1}$ , для объекта  $o_k$  с учетом

степени его принадлежности к кластеру  $O_l = T^l$  по фактору  $f_{i2}$ .

В случае если объект попал одновременно в несколько кластеров, оценки, полученные для каждого кластера, агрегируются с помощью операции максимума:

$$\mu_{T^m(f_{i1}^k)} = \max\{\mu_{T^m(f_{i1}^k) | T^l(f_{i2}^k)}, \mu_{T^m(f_{i1}^k) | T^{l2}(f_{i2}^k)}\}.$$

Схематично процедура получения оценки с учетом влияния внешнего фактора проиллюстрирована на рис. 3.

Если на один и тот же фактор влияют несколько внешних факторов, оценки, полученные с учетом влияния каждого отдельного внешнего фактора, агрегируются с помощью операции минимума.

Оценка факторов, у которых нет индикаторов или нет возможности получить значения индикаторов, может быть получена на основе оценок других факторов. Рассмотрим две ситуации: оценивается фактор, являющийся следствием других оцененных факторов (рис. 4, а); оценивается фактор, влияющий наряду с другими факторами на некоторый оцененный фактор (рис. 4, б).

Одним из возможных подходов является использование нечетких продукционных правил, содержащих в антецеденте возможные состояния оцененных факторов и в консеквенте – соответствующие состояния оцениваемого фактора.

В ситуации, представленной на рис. 4, а на фактор  $f_1$  влияют факторы  $f_2$  и  $f_3$  ( $f_2 R^{FE} f_1, f_3 R^{FE} f_1$ ), для которых оценки получены путем фаззификации значений индикаторов  $e_2$  и  $e_3$  ( $f_2 R^{FE} e_2, f_3 R^{FE} e_3$ ). Формат правил для определения оценки фактора  $f_1$  будет следующий:

ЕСЛИ  $f_2$  есть  $T^i(f_2)$  И  $f_3$  есть  $T^j(f_3)$ , ТО  $f_1$  есть  $T^k(f_1)$ , где  $T^i(f_2), T^j(f_3), T^k(f_1)$  – нечеткие оценки факторов  $f_2, f_3, f_1$ .

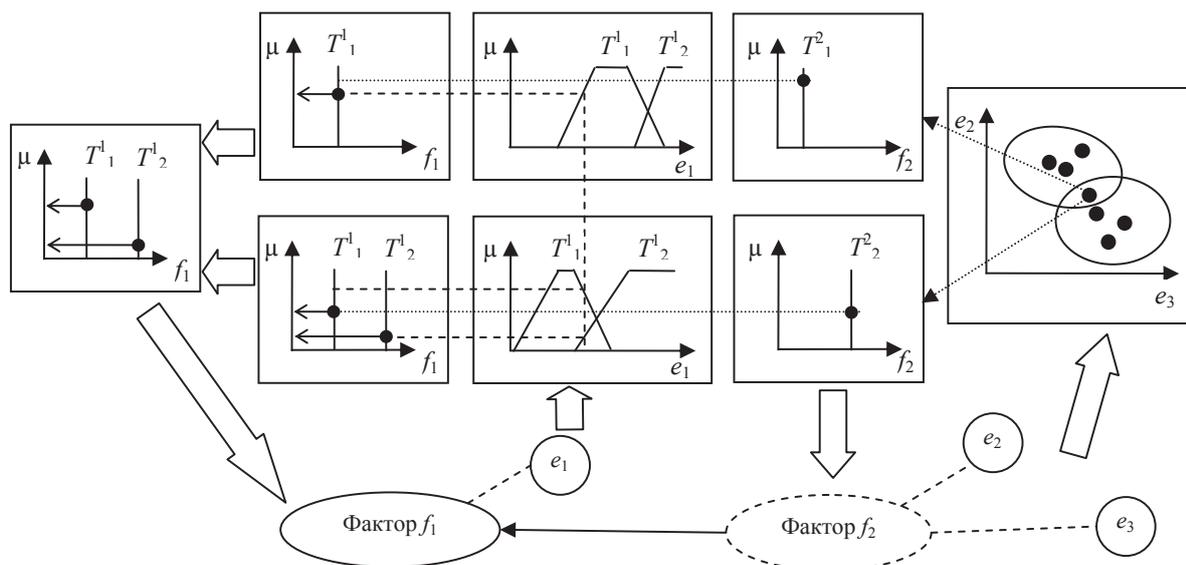
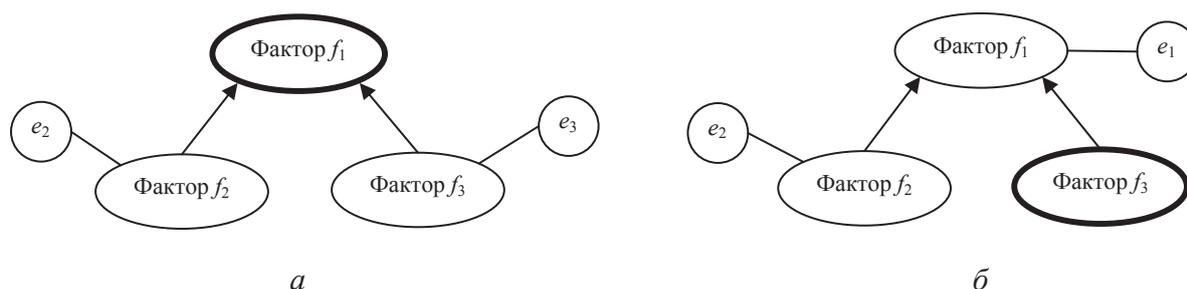


Рис. 3. Ситуация оценивания фактора по индикатору с учетом влияния внешнего фактора



**Рис. 4.** Ситуации косвенного оценивания факторов: а) оценивается фактор, являющийся следствием других оцененных факторов; б) оценивается фактор, влияющий наряду с другими факторами на оцененный фактор

В ситуации, представленной на рис. 4, б оценки факторов  $f_1$  и  $f_2$  определяются на основе значений индикаторов  $e_1$  и  $e_2$  ( $f_1 R^{FE} e_1, f_2 R^{FE} e_2$ ), необходимо вывести оценку фактора  $f_3$ , влияющего совместно с фактором  $f_2$  на фактор  $f_1$ . Формат правил будет следующий:

ЕСЛИ  $f_1$  есть  $T^i(f_1)$ , И  $f_2$  есть  $T^i(f_2)$  ТО  $f_3$  есть  $T^i(f_3)$ .

При построении правил необходимо учитывать характеристики отношений влияния, установленных между факторами, связываемыми правилами, а именно направление (положительное или отрицательное) и силу влияния. Правила могут быть оценены весовыми коэффициентами в виде числовых значений из интервала  $[0,1]$ . Коэффициенты отражают уверенность экспертов в достоверности правил. При их назначении нужно учесть, что на целевой фактор, присутствующий в условной или заключительной части правила, могут влиять неучтенные факторы, не отраженные на диаграмме. В этом случае весовой коэффициент соответствующих правил может быть невысоким. По мере накопления статистики правила могут корректироваться. Для повышения их объективности и при наличии обучающих выборок может быть использован гибридный подход, сочетающий нейронные сети и продукционные системы.

Альтернативным способом косвенного оценивания факторов являются операции с четкими или нечеткими числами, например процедура аккумулярования влияния нескольких концептов на один концепт, используемая в картах Коско [3], или операция свертки с нечеткими треугольными числами. В последнем случае необходимо разработать процедуры преобразования нечетких значений лингвистических переменных в нечеткие числа, а также в интерпретации вычисленного значения выходного фактора.

По результатам анализа гибридной когнитивной карты может быть построено дерево причин. Оно показывает текущие состояния факторов, влияющих на энергоэффективность, для конкретного территориального образования и объяс-

няет, почему, под влиянием каких причин сложились эти состояния. Дерево причин формируется на основе соответствующей когнитивной карты путем сопоставления каждому фактору его оценки [6].

#### Выводы

Предлагаемый подход позволяет не просто оценить уровень энергоэффективности в территориальных образованиях, но и проанализировать причины сложившейся ситуации и определить основные направления проведения энергосберегающей политики. Использование иерархических гибридных когнитивных карт дает следующие преимущества: возможность детального рассмотрения отдельных подсистем, каждой из которых может быть поставлена в соответствие своя карта; повышение обоснованности выбора индикаторов за счет явного выделения концептов-факторов и концептов-индикаторов и отображения связей между факторами и индикаторами; сочетание различных способов оценивания факторов (фазсификации, кластеризации, нечеткого продукционного вывода и др.); учет внешних (природно-климатических, социально-экономических, инфраструктурных и др.) особенностей территориальных образований. Результаты анализа могут быть представлены в виде дерева причин, демонстрирующего причинно-следственные цепочки между состояниями различных факторов. Дальнейшие исследования связаны с разработкой процедур преобразования лингвистических переменных в нечеткие величины, автоматического выявления силы влияния факторов друг на друга, оценки динамики изменения состояния факторов.

Описанный метод положен в основу разрабатываемой в настоящее время информационной системы интеллектуальной поддержки принятия решений по повышению энергетической эффективности территориальных образований.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-07-00397а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванченко О.Г., Голованова Л.А. Методические положения зонирования территории регионов по признакам энергосбережения // Вестник ТОГУ. – 2008. – № 2 (9). – С. 57–68.
2. Лебедев Ю.А., Летагина Е.Н., Сидоренко Ю.А. К вопросу об оценке энергоэффективности регионов // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2012. URL: <http://uecs.ru/uecs40-402012/item/1273-2012-04-21-05-34-08> (дата обращения: 13.09.2012).
3. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.
4. Fuzzy Cluster analysis: methods for classification, data analysis, and image recognition / F. Hoepfner, F. Klawonn, R. Kruse, T. Runkler. – NY: John Wiley & Sons, Inc., 1999. – 300 p.
5. Оценка энергетической эффективности муниципальных образований на основе нечеткой интерпретации данных / М.П. Силич, С.В. Аксенов, В.С. Ахмедов, В.И. Скрябин // Информационные и математические технологии в науке и управлении: труды XVII Байкальской Всеросс. конф. Ч. III. – Иркутск: ИС-ЭМ СО РАН, 2012. – С. 129–134.
6. Оценка ситуации с энергетической эффективностью в муниципальных образованиях на основе диаграммы влияния факторов / М.П. Силич, В.А. Силич, С.В. Аксенов, В.С. Ахмедов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – № 3. – С. 9–14.

Поступила 27.03.2013 г.

UDC 004.81

## ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF TERRITORIES BASED ON HYBRID COGNITIVE MAPS HIERARCHY

M.P. Silich\*, V.A. Silich, S.V. Aksenov

Tomsk Polytechnic University

\*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

*Unsolved problem of the situation analysis in the territorial energy saving sphere providing incompleteness of source data and ambiguity of their interpretation causes the actuality of the research. The objective of the paper is the development of cognitive approach to the energy efficiency state analysis for different territories that allows not only estimating the level of energy efficiency but also analyzing the causes of the current situation and identifying the key areas of energy saving policy. The authors use fuzzy cognitive cards' building methods, fuzzy estimation methods and fuzzy production inference, clustering methods.*

**Results:** hybrid cognitive card structure is introduced; cognitive cards hierarchy building is described; case-approach to cognitive cards analysis is proposed; factor assessment methods for different situations are considered.

**Conclusion.** The use of hierarchical hybrid cognitive cards provides the following advantages: the possibility of detailed review of separate subsystems, the increase of validity at indicator choice, the combination of different methods of factor assessment, the analysis of territorial external features. The outcomes of analysis can be represented as a reason tree that displays causal chains between states of different factors.

### Key words:

Energy efficiency, territories, hybrid cognitive map, factors fuzzy measurement.

## REFERENCES

1. Ivanchenko O.G., Golovanova L.A. Metodicheskie polozheniya zonirovaniya territorii regionov po priznakam energosberezheniya [Methodological positions of region zoning according to energy saving indices]. *Vestnik TOGU*, 2008, no. 2 (9), pp. 57–68.
2. Lebedev Yu.A., Letyagina E.N., Sidorenko Yu.A. K voprosu ob otsenke energoeffektivnosti regionov [On the issue of assessing regional energy efficiency]. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronny nauchny zhurnal*, 2012. Available at: <http://uecs.ru/uecs40-402012/item/1273-2012-04-21-05-34-08> (accessed 13.09.2012).
3. Borisov V.V., Kруглов V.V., Fedulov A.S. *Nechetkie modeli i seti* [Fuzzy models and networks]. Moscow, Goryachaya liniya-Tekom, 2007. 284 p.
4. Hoepfner F., Klawonn F., Kruse R., Runkler T. *Fuzzy Cluster analysis: methods for classification, data analysis, and image recognition*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1999. 300 p.
5. Silich M.P., Aksenov S.V., Akhmedov V.S., Skryabin V.I. Otsenka energeticheskoy effektivnosti munitsipalnykh obrazovaniy na osnove nechetkoy interpretatsii dannykh [Estimation of power efficiency of municipal formations on the basis of fuzzy data interpretation]. *Informatsionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii. Trudy XVII Baykalskoy Vserossiiskoy konferentsii*. [Proc. XVII Baikal All-Russian conference. Information and mathematical technologies in science and control]. Irkutsk, IS-JeM SO RAN, 2012, P. III, pp. 129–134.
6. Silich M.P., Silich V.A., Aksenov S.V., Akhmedov V.S. Otsenka situatsii s energeticheskoy effektivnostyu v munitsipalnykh obrazovaniyakh na osnove diagrammy vliyaniya faktorov [Estimation of energy efficiency in municipal formations on the basis of factor determination diagram]. *Energobezopasnost i energosberezhenie*, 2012, no. 3, pp. 9–14.

# Управление техническими системами

УДК 681.3.06

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГА ФУНКЦИЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ МЕТОДОМ ИЗОБРАЖАЮЩИХ ВЕКТОРОВ

Ю.Н. Шалаев

Томский политехнический университет

E-mail: shalaev@tpu.ru

Рассматривается цифровой способ сдвига функции во временной области методом изображающих векторов. Это операторный метод, который всякой временной функции на конечном промежутке времени ставит в соответствие  $p$ -мерный вектор, а линейному оператору – матрицу ( $p \times p$ ). Дальнейшие преобразования, необходимые для сдвига функции, ведутся численными методами. Функции времени ставится в соответствие вектор, который называется изображающим вектором, а операции сдвига в прямом и противоположном направлениях – матричные операторы, которые находятся заменой в звене запаздывания оператора преобразования Лапласа матрицей дифференцирования. Оператор сдвига функции во временной области находится путем вычисления коэффициентов ряда по известному разложению матричной экспоненты в ряд Фурье. Восстанавливается функция времени скалярным произведением изображающего вектора на вектор полиномов Чебышева второго рода. Все это позволяет успешно использовать вычислительную технику, а окончательный результат на основании формулы обращения записать в аналоговой форме в виде функции времени. Предлагается способ разложения целых положительных чисел  $n$  степени в ряд нечетных чисел. Коэффициентом разложения положительных целых чисел является сумма геометрической прогрессии. Этот способ разложения связывает произведение и сумму целых положительных чисел и позволяет заменить  $n$  степень положительного целого числа суммой ряда нечетных положительных чисел. В качестве примера рассматривается разложение единицы (как самое сложное число) в пятую степень.

### Ключевые слова:

Оператор сдвига, изображающий вектор, степень целых положительных чисел, ряд нечетных целых чисел.

### Введение

При анализе и моделировании динамических систем возникает задача сдвига функций во временной области, то есть экстраполяция функции на заданную величину времени  $k$ . Задача сдвига функции во временной области решается методом изображающих векторов, который изложен в работах [1–3]. Метод изображающих векторов – это операторный метод, который всякой временной функции на конечном промежутке времени ставит в соответствие  $p$ -мерный вектор, а линейному оператору – матрицу ( $p \times p$ ). Суть метода изображающих векторов состоит в том, что каждой функции  $f(t)$  ставится в однозначное соответствие вектор  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_p\}$ , элементы которого коэффициенты ряда Фурье. Для функции  $f(t)$ , определенной на промежутке времени  $[0, t_0]$ , имеет место разложение

$$f(\tau) = \sum_{i=0}^p f_i T_i(\tau),$$

где  $f_i$  – коэффициенты Фурье;  $T_i(\tau)$  – ортонормированные смещенные полиномы Чебышева I-го рода;  $\tau = t/t_0$  – безразмерная независимая переменная.

### Объекты и цель исследования

При обработке опытных значений некоторой функции на интервале наблюдения  $[0, t_0]$  часто возникает задача экстраполяции ее на последующий интервал наблюдения. Если в результате контроля выбранного параметра системы получен ряд значений  $f(\tau_1), f(\tau_2), \dots, f(\tau_p)$ , то требуется вычислить значение параметра  $f(\tau_{p+1})$  в последующий момент времени.

### Метод исследования

Для сдвига функции во временной области на заданную величину времени  $k$  вводится оператор сдвига  $B_k$ , задаваемый как

$$B_k f(t) = f(t+k). \quad (1)$$

Для нахождения структуры оператора  $B_k$  воспользуемся известным соотношением [4]

$$L\{f(t+k)\} = e^{sk} F(s). \quad (2)$$

В соотношении (2) оператором сдвига является величина  $e^{sk}$ , которая согласно методу изображающих векторов имеет вид

$$B_k = e^{Dk}, \quad (3)$$

где  $D$  – матрица дифференцирования – приведена в [1]. Как известно, матричную экспоненту (3) можно представить в виде матричного ряда [3]

$$e^{Dk} = E + \sum_{i=1}^n \frac{k^i D^i}{i!}. \quad (4)$$

При изменении знака в показателе степени в выражениях (3) и (4) получим оператор сдвига функции времени в противоположном направлении

$$B_{-k} = E + \sum_{i=1}^n \frac{(-k)^i D^i}{i!}. \quad (5)$$

Динамику системы управления успешно описывают с помощью дифференциальных и интегральных уравнений [4]

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^{i-n}}{dt^{i-n}} y(t) = \sum_{j=0}^m b_j \frac{d^{j-m}}{dt^{j-m}} u(t). \quad (6)$$

Формальная структура системы управления на основании многих источников определена в виде дифференциального уравнения (6). Оператор идентификации объекта управления запишем в виде передаточной функции

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)}. \quad (7)$$

Таким образом, задача оценки параметров передаточной функции по виду переходного процесса системы управления  $h(t)$  сводится к оценке конструктивных параметров  $m$  и  $n$  передаточной функции (7), при этом  $m < n$ , и нахождению неизвестных параметров модели  $a_i$  ( $i=0, n-1$ ) и  $b_j$  ( $j=0, m$ ).

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом изображающих векторов, для этого переходной процесс  $h(t)$  преобразуем в изображающий вектор по соотношениям [2, 3], получим

$$H = \{h_1, h_2, \dots, h_p\}. \quad (8)$$

По вектору (8) и из формулы обращения [1, 2] получаем аналитическую зависимость переходного процесса в виде полинома порядка  $p$ :

$$h(t) = (H, T(t)) \lim_{g \rightarrow \infty} \frac{W(g)}{W(c * g)} = c^{n-m}. \quad (9)$$

По аналитической зависимости (9) функции  $h(t)$  находим время переходного процесса  $t_0$  от момента включения системы до момента, когда модуль отклонения переходного процесса от установившегося значения не превосходит заданной величины зоны нечувствительности.

Для нахождения весовой функции системы  $w(t)$  воспользуемся дифференциальной связью между весовой и переходной функциями

$$w(t) = \frac{d}{dt} h(t). \quad (10)$$

В области изображающих векторов соотношение (10) запишется как

$$w = DH. \quad (11)$$

По соотношению (9) получаем аналитический вид весовой функции

$$w(t) = (w, T(t)). \quad (12)$$

По весовой функции (12) получаем числовую характеристику передаточной функции, для этого воспользуемся интегральным преобразованием Лапласа

$$W(g_i) = \int_0^{\infty} w(t) \exp(-g_i t) dt, \quad (13)$$

где  $g_i$  – вещественный параметр на интервале  $[0, t_0]$ ;  $W(g_i)$  – оператор системы управления. Необходимо отметить, что для устойчивых динамических систем весовая функция (12) определена на интервале  $[0, t_p]$ , то есть на время переходного процесса, на последующем участке наблюдения она равна нулю. На основании этого вывода интегральное преобразование Лапласа (13) рассматривается в пределах времени переходного процесса.

Оператор системы управления (6) для вещественной переменной запишется как

$$W(g) = \frac{b_m g^m + b_{m-1} g^{m-1} + \dots + b_1 g + b_0}{g^n + a_{n-1} g^{n-1} + \dots + a_1 g + a_0}, \quad (14)$$

где  $a_i$  ( $i=0, n-1$ ),  $b_j$  ( $j=0, m$ ) – коэффициенты передаточной функции.

Для оценки конструктивных параметров  $n$ ,  $m$  воспользуемся [2], уравнениями (13, 14) и предельным соотношением

$$\lim_{g \rightarrow \infty} \frac{W(g)}{W(c * g)} = c^{n-m}, \quad (15)$$

где  $c > 1$ . Опытным путем получено, что лучший результат оценки конструктивных параметров  $m$  и  $n$  достигается при  $c=2$ . Из полученного соотношения (15) находится оценка конструктивных параметров

$$\hat{n - m} = \frac{\ln c^{n-m}}{\ln c}.$$

В результате введенных допущений при оценке параметров  $n$ ,  $m$  получается вещественное число, содержащее целую часть и мантиссу. Мантиссу полученного выражения принимаем за единицу и прибавляем к целой части. Для нахождения параметра  $m$  воспользуемся оператором сдвига (4) и, изменяя величину времени  $k$  на заданный период времени, находим количество нулей  $m$  передаточной функции. Таким образом, задача нахождения конструктивных параметров  $n$ ,  $m$  решена.

Для нахождения коэффициентов передаточной функции необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений порядка  $n+m+1$  следующего вида:

$$g_k^n W(g_k) + W(g_k) \sum_{i=0}^{n-1} a_i g_k^i - \sum_{j=0}^m b_j g_k^j = 0, \\ k = 0, n + m + 1.$$

### Результаты исследования

По найденным коэффициентам  $a_i, b_j$  и конструктивным параметрам  $n$  и  $m$  записываем передаточную функцию исходной системы, то есть находим структуру исследуемой динамической системы.

Необходимо отметить, что переходной процесс (9) может быть на выходе нестационарной и нелинейной динамических систем. Изложенный метод оценки параметров динамических систем позволяет аппроксимировать эти системы передаточными функциями линейных динамических систем.

При моделировании систем и составлении программ рассматривается возможность замены операции возведения целых положительных чисел в  $n$  степень суммой числового ряда вида

$$x^n = \sum_{i=0}^{x-1} (2R(x, n) i + 1), \quad (16)$$

где  $R(x, n) = 1 + x + x^2 + \dots + x^{n-2}$ .

Выражение  $R(x, n)$  представляет сумму геометрической прогрессии плюс единица, тогда на основании известного соотношения [5, 6]  $R(x, n)$  примет следующий вид

$$R(x, n) = 1 + \frac{x(x^{n-2} - 1)}{x - 1}. \quad (17)$$

Преобразуем соотношение (16) к виду

$$x^n = R(x, n) \sum_{i=0}^{x-1} 2i + \sum_{i=0}^{x-1} 1, \quad (18)$$

и на основании известных соотношений [5, 6] выражение (18) запишется как

$$x^n = R(x, n)(x^2 - x) + x. \quad (19)$$

Подставим в выражение (19) соотношение (17), получим уравнение вида

$$x^n = \left(1 + \frac{x(x^{n-2} - 1)}{x - 1}\right)(x^2 - x) + x. \quad (20)$$

После алгебраических преобразований для выражения (20) получим тождество, то есть  $x^n$ . Таким образом, соотношение (16) доказано. В частности, при  $R(x, n) = 1$  получим известное разложение квадрата целого положительного числа  $x$  в виде суммы целых положительных нечетных чисел. Для иллюстрации предложенного метода разложения целого положительного числа в  $n$  степень рассмотрим разложение единицы, например в пятую степень. Коэффициент  $R(x, n)$  будет равен четырем, но первое слагаемое в соотношении (18) принимает нулевое значение, а второе слагаемое при любых  $n$  будет принимать значение единица.

### Выводы

В работе вводится оператор сдвига на основе звена запаздывания [4], который позволяет оценить количество нулей передаточной функции исследуемой динамической системы. По полученным конструктивным параметрам и найденным коэффициентам записывается передаточная функция исходной системы, то есть решается задача идентификации по виду переходного процесса исследуемой динамической системы. Кроме этого, любую степень целого положительного числа можно представить в виде суммы целых нечетных положительных чисел, что показывает связь между степенью и суммой целых положительных чисел.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осипов В.М. Основы метода изображающих векторов и линейное преобразование сигналов // в сб.: Вопросы программирования и автоматизации проектирования. – Томск: Изд-во Томского университета, 1971. – Вып. 1. – С. 1–13.
- Шалаев Ю.Н. Моделирование нестационарных динамических систем методом изображающих векторов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 44–47.
- Шалаев Ю.Н. Обработка экспериментальных данных методом изображающих векторов. Математическое и программное

- обеспечение проектирования систем. Вып. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – С. 99–101.
- Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
- Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т. 1. – М.: Наука, 1966. – 632 с.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

Поступила 09.10.2013 г.

UDC 681.3.06

**MODELING OF FUNCTION SHIFT IN TIME DOMAIN BY THE DEPICT VECTORS METHOD**

Yu.N. Shalaev

Tomsk Polytechnic University

The author has considered the digital way of shifting function in the time domain using the method of representing vectors. This is the operational method which assigns a  $p$ -dimensional vector to any time functions at finite time interval and assigns matrix ( $p \times p$ ) to linear operator. Further changes necessary to shift the functions are carried out by numerical methods. A function of time is associated with a vector which is called a depicting vector, and shift operations in the direct and opposite direction are associated with matrix operators, the latter are replaced in the operator delay chain of Laplace transform by the differentiation matrix. The shift operator function in the time domain is found by calculating the series coefficients by the known degradation of the matrix exponential in the Fourier series. The time function is recovered by the depicting vector inner product on the vector of Chebyshev polynomials of the second kind. All this allows applying successfully the computer equipment and recording the final result on the basis of the inversion formula in analog form as a function of time. The author proposes the method of expansion of positive integers of  $n$  degree into a series of odd numbers. The sum of a geometric progression is the coefficient of expansion of positive integers. This method binds the product of decomposition and the amount of positive integers and allows replacing the  $n$  degree of a positive integer by a sum of the series of odd positive integers. Unity (as the most complex number) expansion to the fifth power is considered as an example.

**Key words:**

Shift operator, representing vector, degree of positive integers, a number of odd integers.

**REFERENCES**

1. Osipov V.M. Osnovy metoda izobrazhayushchih vektorov i lineynoe preobrazovanie signalov [The bases of the technique of representing vectors and signals linear transformation]. *Voprosy programirovaniya i avtomatizatsii proektirovaniya* [Issues of design programming and automation]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1971. Iss. 1, pp. 1–13.
2. Shalaev Yu.N. Modelirovanie nestatsionarnykh dinamicheskikh sistem metodom izobrazhayushchih vektorov [Modeling non-stationary dynamic systems by the method of representing vectors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 7, pp. 44–47.
3. Shalaev Yu.N. Obrabotka eksperimentalnykh dannykh metodom izobrazhayushchih vektorov [Processing of the experimental data by the method of representing vectors]. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie proektirovaniya sistem* [Software of system design]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2002. Iss. 2, pp. 99–101.
4. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automated control systems]. Moscow, Nauka, 1972. 768 p.
5. Berezin I.S., Zhidkov N.P. *Metody vychisleniy* [Computation techniques]. Moscow, Nauka, 1966. Vol. 1, 632 p.
6. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical reference book for researchers and engineers]. Moscow, Nauka, 1974. 832 p.

УДК 681.51.01

## ИНДЕКСЫ КАУЗАЛЬНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СХЕМОТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРИ ОЦЕНКЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.М. Малышенко

Томский политехнический университет

E-mail: mam@tpu.ru

Определена сущность свойства каузальности вход-выходных систем, указана его квалиметрия, в том числе с использованием предложенных ранее автором индексов каузальности. Приведены сведения о расчете этих индексов по диграфам системы, по ее матрицам смежности и достижимости, а также с использованием программного обеспечения, разработанного с участием автора, для случая линейных динамических систем, процессы в которых описываются математическими моделями с непрерывным и дискретным временем. Показано, каким образом индексы каузальности многомерных по входу и выходу объектов могут использоваться при схемотехническом проектировании для них систем автоматического управления (САУ), а также при оценке сильной и слабой функциональной воспроизводимости управляемых объектов и САУ.

### Ключевые слова:

Каузальность, индексы каузальности и их определение, вход-выходная динамическая система, система автоматического управления, схемотехническое проектирование, оценка, сильная и слабая функциональная воспроизводимость.

### Введение

Целью данной статьи является привлечение внимания специалистов, занимающихся исследованием, проектированием и эксплуатацией вход-выходных динамических объектов и систем, и прежде всего систем автоматического управления (САУ), к свойству каузальности динамических систем, по сути, к такому же фундаментальному их свойству, как хорошо уже известные свойства устойчивости, а также управляемости, наблюдаемости, достижимости и восстанавливаемости (УНДВ). И если устойчивость систем является объектом исследования уже примерно полтора столетия, а УНДВ – около полувека, то каузальность систем еще не достаточно хорошо изучена. В то же время она также определяет потенциальные свойства характеризуемых ею систем, а ее количественные меры могут быть целенаправленно использованы при разработке многих объектов и систем различного назначения. В частности, как будет показано ниже, информация о количественных характеристиках каузальности объектов управления может быть эффективно использована при решении задач схемотехнического проектирования для них САУ, оценке функциональной воспроизводимости и самих объектов управления, и системы автоматического управления в целом.

**Каузальность** (лат. – *causalis*, англ. – *causality*) является одним из основополагающих понятий философии, выполняющих важнейшую методологическую роль в научном познании и описании физического мира. Она означает причинность, причинную взаимообусловленность событий во времени, при которой при воздействии одного объекта (причина) происходит соответствующее ожидаемое изменение другого объекта (следствие). Причем будущее течение многих процессов оказывается зависящим не только от настоящего, но и существенно определяется их предысторией.

Строгое формализованное определение свойства причинности (каузальности) введено в математику для характеристики используемых в ней операторов отображения одних множеств на другие лишь в 60-х гг. прошлого века, хотя ее суть уже давно используется в абсолютном большинстве математических моделей, описывающих реальные процессы. При этом оператор  $A$ , определенный на  $X$  со значениями в  $Y$ , называется **каузальным** (причинным) относительно семейств подпространств  $(X_a)$  и  $(Y_a)$ , если для любого  $a \in A$  образ  $AX_a$  лежит в  $Y_a$ , т. е. упорядоченная пара подпространств  $(X_a, Y_a)$  инвариантна относительно оператора  $A$  [1]. Наиболее полное определение каузального оператора дано в [2]: оператор  $A$  каузален, если при  $\forall t \in R$  имеет место включение  $AX_t \subseteq Y_t$ , где

$$X_t = \{x \in X : x(s) = 0 \quad \forall s < t\}$$

$$\text{и } Y_t = \{y \in Y : y(s) = 0 \quad \forall s < t\}.$$

На необходимость учета свойства каузальности в общей теории систем впервые было обращено внимание в [3]. В теории систем ввиду разнообразия свойства каузальности у вход-выходных систем последние принято относить к строго каузальным, каузальным, антикаузальным или некаузальным, характеризуемым в последнем случае операторами без памяти [1, 2, 4, 5]. Следует заметить, что в этой части терминология еще не устоялась. В частности, строго каузальные системы и каузальные системы в [6–8] называются, соответственно, **каузальными** и **бикаузальными**, а в [9, 10] – **строго собственными** и **собственными**.

Свойство каузальность отражает факт запаздывания при распространении сигналов от входа к выходу системы. Оно присуще любой системе, обладающей инерционностью, и в этом плане дополнительно характеризует её. Управляемые объекты и системы, к которым относятся, в частности, системы автоматического управления

(САУ), в зависимости от того, в какой мере они обладают указанным свойством, могут быть разделены на 3 класса: *некаузальные*, *каузальные* и *строго каузальные* [11–13].

Некаузальными являются вход-выходные системы, которые не обладают инерционными свойствами, т. е. такие системы, вход-выходные отображения в которых определяются только алгебраическими и/или логическими операторами.

В ряде частных случаев отличить каузальные системы от строго каузальных можно непосредственно по виду их математических моделей. С этой целью воспользуемся для описания процессов в динамических системах моделью типа «вход–состояние–выход» вида

$$\sigma x(t) = g(x(t), u(t)); \quad (1)$$

$$y(t) = h(x(t), u(t)). \quad (2)$$

Полагаем, что в ней  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$  и  $y \in R^p$  – соответственно, векторы состояния, входа и выхода системы. Составляющая  $\sigma x(t)$  для непрерывных систем означает первую производную по времени от  $x(t)$ , а для систем с дискретным аргументом – относительным временем  $t$ , значения которого кратны периоду дискретизации  $T_0$ , эта составляющая равна  $x(t+1)$ .

Система с моделью (1), (2) строго каузальна лишь в том случае, когда выход  $y(t)$  в (2) не зависит от  $u(t)$ . В противном случае она каузальна. Это значит, что у каузальной системы выход  $y(t)$  формируется за счет преобразования и по инерционному, и по безинерционному каналам связи, а в строго каузальной системе – только после прохождения сигнала  $u(t)$  через инерционную часть системы.

#### Квалиметрия каузальности вход-выходных динамических систем

В качестве количественной меры каузальности для одномерных по входу и выходу динамических систем (1), (2) с дискретным временем в [11] предложено использовать величину, названную *характеристическим числом* системы и определенную как момент времени  $t$ , при котором выход системы возбуждается входом, поступившим в момент  $t=0$ . В ряде работ, в частности в [12], для многомерных по входу и выходу линейных непрерывных систем, процессы в которых описываются математической моделью в форме «вход–состояние–выход» вида

$$\sigma x(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3)$$

и с теми же обозначениями, что и в (1), (2), при  $D=0$  аналогичный по сути показатель между входом  $u(t)$  и выходом  $y_i$ , где  $i \in \overline{1, p}$ , называется *дифференциальной степенью системы*  $\delta_i$  *относительно выхода*  $y_i(t)$ . Она определяется как минимальная степень  $N$ , при которой нарушается условие  $c_i A^{N-1} B = 0$ , где  $c_i$  –  $i$ -я строка матрицы  $C$ . Сумма всех  $\delta_i$  системы при этом называется *дифференциальной степенью системы*. Этот же показатель для линейных систем в [14] и для нелинейных в [15] называется их *относительным порядком*.

Указанные выше показатели, как и индексы управляемости, наблюдаемости, достижимости, восстанавливаемости, характеризуют структурные и динамические свойства систем и имеют близкую с ними природу. В этой связи в [13] они названы автором *индексами каузальности*. Тем самым была подчеркнута их принадлежность к указанной группе показателей и суть определяемого ими свойства системы. В этой же публикации даны строгие определения индексов каузальности многомерных по входу и выходу динамических систем с дискретным и непрерывным временем. В частности, для дискретной по времени системы с моделью (1), (2) и начальным состоянием

$$x(0) = 0; \quad y(0) = 0 \quad (4)$$

*индекс каузальности*  $k_{ij}^u$  *системы по выходу*  $y_i$ ,  $i \in \overline{1, p}$  *и входу*  $u_j$ ,  $j \in \overline{1, m}$  – это наименьшее целое  $t$ , для которого при начальном состоянии (4)

$$\frac{\partial}{\partial u_j} (h_i \circ g^t) \neq 0. \quad (5)$$

В этом определении использованы следующие обозначения и допущения:  $h_i(\cdot)$  –  $i$ -я строка вектор-функции  $h(\cdot)$ ; вектор-функции  $g: R^n \times R^m \rightarrow R^n$ ;  $h: R^n \times R^m \rightarrow R^p$  – гладкие, удовлетворяющие условиям  $(0,0)=0$ ,  $hh(0,0)=0$ ;  $x_0=x(0)$ ;  $u_v=u(v)$ ;

$$g^v = g(g(\dots(g(g(x_0, u_0), u_1), u_2), \dots), u_{v-1})).$$

При этом  $h \circ g^v$  – однозначное (сюрьективное) вход-выходное отображение системы на интервале  $0 \leq t \leq v$ .

*Индекс каузальности*  $k_i^v$  рассматриваемой системы по выходу  $y_i$  от всего входа  $u$  – это наименьшее целое  $t$ , для которого при начальном состоянии (4)  $\nabla^u (h_i \circ g^t) \neq 0$ . В этом выражении и далее  $\nabla \mu(T)$  означает градиент  $T$  по  $\mu$ . Наконец, индекс каузальности  $k_c$  рассматриваемой системы по управлению – это наименьшее целое  $t$ , для которого при начальном состоянии (4)

$$\nabla^u (h \circ g^t) \neq 0.$$

При таком определении каузальность рассматриваемых систем характеризуется матрицей индексов каузальности  $K^u = [k_{ij}^u]_{pm}$ . При этом

$$k_i^u = \min \{k_{ij}^u : j \in \overline{1, m}\}. \quad (6)$$

$$k^u = \min \{k_j^u : i \in \overline{1, p}, j \in \overline{1, m}\}. \quad (7)$$

Если у объекта управления  $k_{ij}^u=0$ , то это значит, что его выходная переменная  $y_i$  начинает меняться одновременно с началом изменения  $u_j$ ,  $j \in \overline{1, m}$ , т. е. между ними существует не только инерционный, но и безинерционный каналы связи. В ситуациях, когда управление  $u_j$  не влияет на  $y_i$ , считаем, что индекс каузальности  $k_{ij}^u = \infty$ .

Если анализируемая система подвержена не только входным воздействиям  $u(t)$ , но и возмущениям  $f \in R^r$ , так что ее модель в форме «вход–состояние–выход» имеет вид

$$\sigma x(t) = g(x(t)u(t), f(t)); \quad y(t) = h(x(t), u(t), f(t)),$$

то и связь выхода системы  $y(t)$  с возмущением  $f(t)$  может характеризоваться матрицей индексов каузальности  $K^u = [k_{ij}^u]_{pr}$ , определяемой аналогичным способом.

Индексы каузальности могут использоваться и для характеристики свойств непрерывной системы с моделью вида (1), (2). В этом случае под индексом каузальности  $k_{ij}^u$  по входу  $u_i$  и выходу  $y_j$  следует понимать минимально возможный порядок  $\alpha \geq 0$  отличной от нуля в момент  $t=0_+$  производной  $y_j^{(\alpha)}(t)$  реакции системы на управление  $u_i(t)$  при начальном условии (4) и определять его согласно (5). Соответственно, индексы каузальности системы по выходу  $y_i$  и системы в целом определяются в соответствии с (6) и (7).

Вычисление индексов каузальности может производиться как по диграфам анализируемой системы, так и с использованием матриц смежности и достижимости [13, 16].

При относительно невысоком порядке линейной многомерной системы с математической моделью вход-выходных отображений (3) более просто индексы каузальности вычисляются по диграфу системы, т. е. ориентированному графу, вершинами которого являются переменные, входящие в векторы состояния  $x \in R^n$ , входы  $u \in R^m$  и выходы  $y \in R^p$  системы. Дуги в этом диграфе определяются по скелетным матрицам  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$ ,  $\bar{D}$ , которые получают заменой на единицы всех ненулевых элементов (вне зависимости от их знака) в матрицах  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  модели (3). Заметим, что дуги – петли при вершинах  $x_i$ ,  $i \in 1, n$  – в диграфе системы не указываются.

Например, если в математической модели (3) анализируемой на каузальность системы матрицы

$$\begin{aligned}
 & D = 0, \\
 & A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{35} & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & 0 & 0 \\ 0 & a_{62} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\
 & B = \begin{bmatrix} 0 & b_{12} & 0 \\ b_{21} & 0 & 0 \\ b_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{43} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\
 & C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{26} \end{bmatrix}, \quad (8)
 \end{aligned}$$

то матрицам  $A$ ,  $B$ ,  $C$  с указанными в них ненулевыми элементами будут соответствовать скелетные матрицы

$$\begin{aligned}
 \bar{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\
 \bar{C} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

При этом элементу  $\bar{a}_{ij}=1$  матрицы  $\bar{A}$  соответствует в диграфе дуга, выходящая из вершины  $x_j$  в вершину  $x_i$  ( $i, j \in 1, n$ ), элементу  $\bar{b}_{ij}=1$  матрицы  $\bar{B}$  – дуга из  $u_j$ ,  $j \in 1, m$  в  $x_i$ ,  $i \in 1, n$ . Аналогично  $\bar{c}_{ij}=1$  порождает в диграфе системы дугу из  $x_j$  в  $y_i$ , а  $\bar{d}_{ij}=1$  – дугу из  $u_j$  в  $y_i$ . Нулевые элементы матриц  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$ ,  $\bar{D}$  указывают на то, что в диграфе системы отсутствуют дуги между соответствующими этим элементам вершинами.

Диграф данной системы имеет приведенный на представленном рисунке вид.

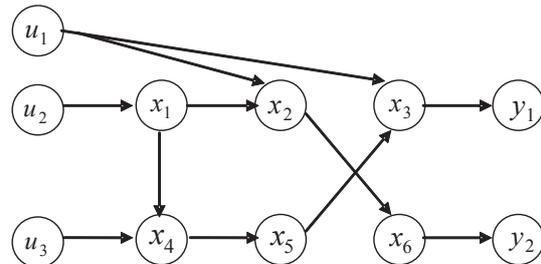


Рисунок. Диграф системы, описываемой уравнениями (3) при указанных в (8) матрицах  $A$ ,  $B$ ,  $C$

По диграфу системы (3) ее индекс каузальности между входом  $u_j$  и выходом  $y_i$  определяется как уменьшенное на единицу число дуг в маршруте наименьшей длины между вершинами  $u_j$  и  $y_i$ . Индексы каузальности по выходу  $y_i$  и в целом системы определяются после этого согласно (6) и (7).

В данном случае в соответствии с этим правилом по приведенному выше диграфу системы получаем ее матрицу индексов каузальности по входу  $u(t)$

$$K^u = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 \\ 2 & 3 & \infty \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Процедура вычисления индексов каузальности по диграфу системы может быть заменена вычислением этих показателей по матрицам достижимости, формируемым из матрицы смежности системы. Последняя для систем с вход-выходной моделью (3) представляет собой квадратную булеву матрицу размера  $\alpha \times \alpha$ , где  $\alpha = n + m + p$ , вида

$$E = \begin{bmatrix} \bar{A}_{nn} & \dots & \bar{B}_{nm} & \dots & 0_{np} \\ 0_{mn} & \dots & 0_{mm} & \dots & 0_{mp} \\ \bar{C}_{pn} & \dots & \bar{D}_{pm} & \dots & 0_{pp} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Индексы в (11) указывают на размерность соответствующих блочных матриц, например,  $\bar{B}_{nm}$  – ма-

трица размерности  $m \times n$ . В случае, когда в (3)  $D=0$ , вместо матрицы  $D_{pm}$  в (10) вводится нуль-матрица  $0_{pm}$ .

Матрицы достижимости  $SN$ ,  $N=1,2,3...$  для рассматриваемого класса систем определяются как

$$SN = [s_{ij}]_{\alpha\alpha} = ((I_{\alpha} + E)^N)^* = ((SI)^N)^*, \quad (11)$$

где  $I_{\alpha}$  – единичная  $\alpha \times \alpha$  матрица, а символ «\*» означает, что соответствующие преобразования выполняются по правилам двоичной (булевой) арифметики. При этом если в  $SN$  элемент  $s_{ij}=1$ , то это означает, что от вершины  $V_j$  к вершине  $V_i$  имеется минимум один маршрут длины  $N$ , т. е. состоящий из  $N$  дуг. При  $s_{ij}=0$  такие маршруты отсутствуют.

Если матрицы достижимости  $SN$  системы с моделью вида (3), определенные согласно (11), представить в виде

$$SN = \begin{bmatrix} SN_{nn} & \dots & SN_{nm} & \dots & 0_{np} \\ 0_{mn} & \dots & I_{mm} & \dots & 0_{mp} \\ SN_{pn} & \dots & SN_{pm} & \dots & I_{pp} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

то индексы каузальности системы будут определяться блочными матрицами  $SN_{pm}$ ,  $N \in \overline{1, n}$ . В частности, индекс каузальности системы по входу  $u_j$  и выходу  $y_i$  определяется как

$$k_{ij} = q - 1,$$

где  $q$  – наименьшая степень в  $SN = ((SI)^q)^*$ , при которой в матрице  $SN_{pm}$  ( $i, j$ )-й элемент равен единице. Индексом каузальности  $k_i$  системы по выходу  $y_i$  будет уменьшенное на единицу значение  $q$ , при котором в  $i$ -й строке  $SN_{pm}$  впервые появится отличный от нуля элемент, а индексом каузальности всей системы в целом – уменьшенное на единицу значение  $q$ , при котором в  $SN_{pm}$  впервые появится отличный от нуля элемент. Если же во всем множестве  $SN_{pm}$ ,  $N \in \overline{1, n}$  какой-либо ( $i, j$ )-й элемент остается равным нулю, то это означает, что любое изменение входного воздействия  $u_j$  не приводит к изменениям выходной переменной  $y_i$  системы. В таком случае соответствующий этой вход-выходной связи индекс каузальности  $k_{ij}$  следует принять равным бесконечности.

В частности, для приведенной модели линейной системы (3) с матрицами параметров, указанными в (8), получаем в соответствии с (11), (12)

$$S1_{pm} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad S2_{pm} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad S3_{pm} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$S4_{pm} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad S5_{pm} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad S6_{pm} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

и уже определенную ранее матрицу индексов каузальности системы (9).

Для вычисления индексов каузальности линейных многомерных по входу и выходу систем, процессы в которых описываются уравнениями (3), можно использовать и специальное программное обеспечение [17], в основу которого положено описанное выше вычисление индексов каузальности по матрицам смежности и достижимости.

### Использование индексов каузальности при решении задач схемотехнического проектирования систем автоматического управления

Очевидно, что знание индексов каузальности управляемого объекта между всеми входными управляющими, возмущающими воздействиями и выходными управляемыми переменными дает полное представление обо всех внутренних взаимосвязях указанного множества переменных в данном объекте. Более того, индекс каузальности по каждому вход-выходному каналу объекта отражает меру инерционности этого канала в указанном выше смысле. По этой причине предварительная количественная оценка индексов каузальности объекта управления может позволить при разработке системы управления данным объектом выбрать наиболее эффективные ее схемотехнические решения.

Особенно это важно учитывать при разработке САУ для сложных многомерных по входу и выходу многорежимных объектов управления. К таковым с полным основанием можно отнести, например, многие производственные установки в химической промышленности, современные подвижные объекты. Причем последние, с целью обеспечения их живучести, более высоких тактико-технических данных, проектируются с заведомо избыточной размерностью вектора управления по сравнению с размерностью вектора управляемого выхода [16]. Например, в американском космическом аппарате Шаттл для управления трехмерной угловой ориентацией в космическом пространстве (при трехмерном векторе управляемых переменных) имеется возможность аппаратно реализовать 64 управляющих воздействий – вращающих моментов относительно одной какой-либо строительной оси аппарата.

Схемотехническое проектирование САУ, проводимое на этапе технического предложения, направлено на выбор ее структуры для всех режимов функционирования (причем, часто не только штатных), принципов управления каждой управляемой переменной объекта управления (ОУ) в этих режимах, на аппаратную реализацию составных частей САУ.

Матрица индексов каузальности может быть положена в основу выбора используемых управляющих воздействий в каждом сепаратном канале управления.

В наиболее простом случае, когда размерность векторов управления  $u(t)$  и управляемого выхода  $y(t)$  одинакова, а матрица  $K^u = [k_{ij}^u]_{pm}$  недиагональна, предпочтение следует отдавать такому схемотехническому решению, при котором индексы каузальности между управляющими воздействиями и управляемыми переменными в сепаратных каналах имеют наименьшие возможные значения. Именно этот вариант является наиболее привлекательным по той причине, что в создаваемой САУ будут обеспечены условия для ее наибольшего быстрого действия. Выбор иного варианта схемотехнического решения может быть обусловлен, например, лишь тем, что при более предпочтительном по

быстродействию варианте не достижимы все требуемые области вариации управляемых переменных объекта.

Если же размерность вектора  $u(t)$ , который может быть использован для управления выходом  $y(t)$ , превышает размерность последнего (что часто встречается на практике в силу особенностей самого объекта управления или специально организуется для обеспечения заданных свойств разрабатываемой САУ), то схемотехническое решение системы автоматического управления, как правило, далеко не единственно.

Проиллюстрируем это на примере, когда матрица индексов каузальности объекта управления соответствует вышеприведенному расчетному значению, т. е.

$$K^u = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 \\ 2 & 3 & \infty \end{bmatrix}.$$

В этом случае управление  $u_3$  не может быть использовано для управления второй переменной вектора выхода  $y(t)$ . Для управления этой переменной более предпочтительно из соображений быстродействия разрабатываемой САУ использование управляющего воздействия  $u_1$ . Но это же управление является наилучшим в этом смысле и для управления выходом  $y_1(t)$ . По этой причине, какие из управлений выбрать для каждого из сепаратных каналов САУ, следует решать с учетом других факторов, в частности, обеспечивают ли эти управления заданные диапазоны управляемых переменных, каков уровень перекрестных связей будет при выбранном варианте схемотехнического решения. В ситуациях, когда с помощью одного управляющего воздействия не обеспечивается заданный диапазон какой-либо выходной переменной в системе, можно использовать для соответствующего канала управления два и даже большее число управляющих воздействий. В таком случае предпочтение следует отдавать при возможности выбора тем управлениям, индексы каузальности по которым имеют меньшие значения.

#### Оценка функциональной воспроизводимости системы управления по ее индексам каузальности

Среди типовых задач управления динамическими объектами важное место занимают слежение за входным сигналом – заранее неизвестной функцией времени, а также программное, финитное и терминальное управление. В настоящее время при проектировании САУ, реализующих подобные режимы, основное внимание уделяется оценке их точностных и динамических свойств по традиционным прямым или косвенным показателям качества (таким как ошибка регулирования, величина перерегулирования, колебательность и т. п.). В то же время накладываемые на траектории движения в пространстве состояния и выхода управляемого объекта ограничения, определяемые свойствами последнего и САУ в целом, остаются обычно в лучшем случае мало исследованными.

Установлено, что точностные возможности систем автоматического управления при решении перечисленных выше типовых задач управления в существенной мере предопределяются *функциональной воспроизводимостью* этих систем. Под ней понимают способность таких систем реализовывать заданного класса временные функции в качестве своих выходов при возможных в них начальных условиях и входных воздействиях. Данное свойство представляет несомненный практический интерес, так как очерчивает класс реализуемых без заметных искажений командных (задающих) воздействий и с полным основанием может быть отнесено к числу основных фундаментальных свойств управляемых объектов и систем управления.

В зависимости от условий, налагаемых на начальное состояние системы, и класса функций, подлежащих воспроизведению на ее выходе, различают сильную и слабую функциональную воспроизводимость [18]. При этом *сильную функциональную воспроизводимость* системы определяют как ее способность реализовывать на выходе все непрерывные функции  $\psi: I \rightarrow P^p$  при любом заданном  $x_0 = x(t_0)$ . Она имеет место в линейных динамических системах, процессы в которых описываются уравнениями (3), тогда и только тогда, когда при непрерывном входе  $v: I \rightarrow R^m$  и  $t \in I$

$$\text{rank } D(t) = p. \quad (13)$$

Таким образом, сильная функциональная воспроизводимость может иметь место в линейных динамических системах лишь в тех случаях, когда эти системы относятся к классу каузальных по всем своим выходам. В этом классе систем входные воздействия  $u(t)$  должны влиять на ее выходы непосредственно, а не только через динамическую часть системы. При этом индексы каузальности  $k_i$ ,  $i \in \overline{1, p}$ , определенные по всем выходам системы при  $x(t_0) = x_0$  на всем интервале  $t \in I$ , должны быть равными нулю. Для тех выходов  $y_i(t)$ ,  $i \in \overline{1, p}$ , у которых  $k_i \neq 0$ , сильная функциональная воспроизводимость в указанном выше смысле недостижима ни при каких входных воздействиях  $v: I \rightarrow R^m$ . Аналогичный вывод можно сделать и относительно строго каузальных линейных динамических систем, т. е. таких систем, у которых  $D(t) \equiv 0$ . Именно к этому классу систем и относится абсолютное большинство управляемых объектов и систем автоматического управления.

Следует заметить, что требование сильной функциональной воспроизводимости (13) применительно к объектам и системам автоматического управления является в большинстве конкретных случаев неоправданно завышенным. Действительно, реальные объекты и системы в процессе своего функционирования поддерживают свои переменные в некоторых ограниченных пределах, т. е.  $x(t) \in X \subset R^n$ ,  $u(t) \in U \subset R^m$ , а не в целом в  $R^n$  и  $R^m$ . Кроме того, от САУ далеко не всегда по условиям их эксплуатации требуется высокопрецизионное вос-

произведение заданных траекторий  $y^*(t)$  во всем пространстве  $R^p$ . К тому же эти траектории не обязательно должны быть произвольными по характеру и темпам изменений во времени. Чаще всего в качестве обеспечиваемых выходов  $\psi: I \rightarrow R^p$  в непрерывных системах по условиям их эксплуатации вполне допустимы лишь гладкие функции, имеющие непрерывные по времени производные до  $k$ -го порядка, т. е. можно допускать  $\psi: I \rightarrow Y \in S^{k,p}$ , где под  $S^{k,p}$  при  $k \geq 1$  понимается множество всех векторных аналитических функций размерности  $p$ , имеющих ненулевые производные до  $k$ -го порядка, т. е. принадлежащих классу  $C^k$ . Подобный класс воспроизводимых функций характерен, в частности, для многих систем программного управления технологическим оборудованием, например станков, роботов, где управлению подлежат движения рабочих инструментов по заданному непрерывным пространственным траекториям.

Наконец, начальное состояние системы не обязательно должно быть фиксированным заранее. В некоторых случаях можно допустить его «плавание» в пределах  $x \in X$  или зависимость от вида воспроизводимого выхода системы.

При указанных выше допущениях относительно начальных условий и класса воспроизводимых функций следует говорить о слабой функциональной воспроизводимости вход-выходных систем. При этом под *слабой функциональной воспроизводимостью* класса  $C^k$  при  $k \geq 1$  на интервале  $I$  понимают [18] способность вход-выходной управляемой системы реализовывать любую функцию  $\psi \in S^{k,p}(I)$  в качестве выхода за счет выбора соответствующего начального условия из  $I \times R^n$  и входа  $u(t)$  из  $C^{0,m}(I)$ .

Очевидно, что класс воспроизводимых системой на выходе функций  $y(t)$  зависит от динамических свойств системы и определяет класс необходимых для их реализации управлений  $u(t)$ .

Так как управляемые объекты в САУ чаще всего строго каузальны, а возможности строго каузальной системы по воспроизведению заданных сигналов на выходе тем выше, чем ниже порядок ее слабой функциональной воспроизводимости, представляет прежде всего интерес, при каких условиях такие объекты и системы могут быть слабо  $C^1$ -воспроизводящими в пространствах состояний и выхода, т. е. способными воспроизводить без искажений желаемые непрерывные сигналы (соответственно,  $x(t)$  и  $y(t)$ ) с кусочно-непрерывными первыми производными по времени.

Если в строго каузальной и стационарной системе (3) (при  $D=0$ ) управление  $u(t) \in U \subset C^{1,m}$ , т. е. кусочно-непрерывно, то согласно [19] такая система будет обладать слабой функциональной  $C^1$ -воспроизводимостью в пространстве состояний тогда и только тогда, когда

$$\text{rank } B = n, \quad (14)$$

т. е. когда управление  $u(t)$  способно воздействовать непосредственно на все компоненты вектора

$\dot{x}(t)$ . Слабой функциональной  $C^1$ -воспроизводимостью на целевой траектории  $y^*(t)$  в пространстве  $Y$  при кусочно-непрерывных управлениях из  $U$  данная система обладает согласно [19] тогда и только тогда, когда

$$p \leq m; \quad \text{rank } CB = p. \quad (15)$$

В связи с тем, что порядок системы, как правило, превышает размерность вектора выхода системы, т. е.  $n > p$ , можно сделать заключение, что данное свойство в таких системах может быть достигнуто (и то не всегда) лишь при условии использования в них управлений избыточной размерности. В этом случае может оказаться, что будут такие схемотехнические решения, при которых окажутся выполненными условия (14) и/или (15).

### Заключение

Каузальность управляемых объектов и систем автоматического управления правомерно отнести к группе таких их фундаментальных свойств, как управляемость, наблюдаемость, восстанавливаемость, достижимость и возмущаемость (УНВДВ). Все эти свойства фактически однотипно оцениваются как на бинарном уровне (обладает данным свойством объект или система или же нет), так и индексами [13], подобными определенным выше индексам каузальности. В совокупности индексы каузальности и индексы структурных УНВДВ образуют так называемые структурные инварианты управляемых динамических систем, и все они могут быть определены для линейных систем по их матрицам смежности и достижимости [20].

Практический интерес к перечисленным выше фундаментальным свойствам управляемых объектов и систем, в том числе и к каузальности, обусловлен их явно выраженным влиянием на разрешимость многих задач автоматического управления объектами и достижимые при этом результаты. Оценка этих свойств у объектов и систем обычно проводится не на этапе анализа уже спроектированной системы, а на этапах предпроектных исследований или схемотехнического и параметрического синтеза, когда имеется возможность изменять (подстраивать) параметры системы, и важно знать, возможно ли в принципе выбрать их так, чтобы обеспечивались заданные свойства и характеристики в разрабатываемой системе.

Индексы каузальности многомерного динамического объекта не только отражают структуру их вход-выходных взаимосвязей, но и характеризуют инерционные свойства каждой из этих связей.

Предпроектная оценка каузальности объекта управления, как следует из текста данной статьи, позволяет успешно решать при разработке для такого объекта системы автоматического управления важные задачи при выборе схемотехнического решения САУ, при оценке ее функциональной воспроизводимости и потенциально реализуемых в пространстве состояний и выхода САУ траекторий изменения, соответственно, состояний системы и ее управляемых переменных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feintuch A., Saeks R. *System Theory: A Hilbert Space Approach*. – New York: Academic press, 1982. – 310 p.
2. Криштал И.А. Спектральный анализ каузальных операторов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Воронеж, 2003. – 112 с.
3. Youla D.C., Carlin H.L., Castriota L.J. Bounded Real Scattering Matrices and the Foundations of Linear Passive Network Theory // *IRE Trans. Circuit Theory CT-6*. – 1959. – P. 102–124.
4. Willems J.C. Stability, Instability, Invertibility and Causality, *SIAM J. Control*. – 1969. – V. 7. – № 4. – P. 645–671.
5. DeSantis R.M. Causality, Strict Causality and Invertibility for Systems in Hilbert Resolution Space // *SIAM J. Control*. – 1974. – V. 12. – № 3. – P. 536–553.
6. Commault C., Lafay J.F., Malabre M. Structure of linear systems. Geometric and transfer matrix approaches // *Kybernetika*. – 1991. – V. 27. – № 3. – P. 170–185.
7. Hammer J. Stabilisation of non-linear systems // *Int. J. Control*. – 1986. – V. 44. – № 5. – P. 1349–1381.
8. Hammer J. Robust stabilisation of non-linear systems // *Int. J. Control*. – 1989. – V. 49. – № 2. – P. 629–653.
9. Chan J.-T., Wei L.-F. Adaptive multi-channel signal tracking controller for minimum or nonminimum phase systems // *Int. J. Control*. – 1989. – V. 50. – № 1. – P. 65–73.
10. Rao S.K., Chen C.-T. Design of minimal-degree compensators with assignable poles or structure // *Automatica*. – 1987. – V. 23. – № 2. – P. 241–245.
11. Lee H.G., Aropostathis A., Mareus S.I. Linearisation of discrete-time systems // *Int. J. Control*. – 1987. – V. 45. – № 5. – P. 1803–1822.
12. Roppenecker G., Lohmann B. Vollständige Modale Synthese von Entkopplungsregelungen // *Automatisierungstechnik*. – 1988. – V. 36. – № 11. – S. 434–441.
13. Малышенко А.М. Определение индексов каузальности управляемых динамических систем // *Изв. АН СССР, Техническая кибернетика*. – 1990. – № 1. – С. 32–36.
14. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления. – М.: Наука, 1985. – 296 с.
15. Hirschorn R.M., Davis J.H. Global output tracking for nonlinear systems // *SIAM J. Control and Optimization*. – 1988. – V. 26. – № 6. – P. 1321–1330.
16. Малышенко А.М. Системы автоматического управления с избыточной размерностью вектора управления. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – 302 с.
17. Малышенко А.М., Рыбаков Е.А., Кочеткова Е.А. Программное обеспечение для расчета индексов каузальности линейных вход-выходных динамических систем. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013619662 от 11.10.2013 г.
18. Grasse K.A. Sufficient conditions for the functional reproducibility of time-varying, input-output systems // *SIAM J. Control and Optimization*. – 1988. – V. 26. – № 1. – P. 230–249.
19. Wohltmann H.-W. A note Aoki's conditions for path controllability of continuous-time dynamic economic systems // *Review of Economic Studies*. – 1984. – V. 51. – № 2. – P. 343–349.
20. Малышенко А.М. Определение индексов каузальности, структурных управляемости, наблюдаемости, достижимости и восстанавливаемости линейных динамических систем // *Вестник науки Сибири*. – 2011. – № 1 (1). – С. 374–378. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/77/124> (дата обращения: 12.11.2013).

Поступила 25.10.2013 г.

UDC 681.51.01

## DYNAMIC SYSTEMS CAUSALITY INDICES AND THEIR USE IN SCHEMATIC DESIGN AND IN FUNCTIONAL REPRODUCIBILITY ASSESSMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

A.M. Malyschenko

Tomsk Polytechnic University

*The author has defined the causality properties essence of input-output systems; it contains qualimetry, using the causality indices suggested before by the author. The paper introduces the information on calculation of these indices by the system digraph, by its adjacency and reachability matrices, as well as for the case of linear dynamic systems where the processes are described by mathematical models with continuous and discrete time, using software developed with the author participation. The way the indices of causality of input and output multidimensional objects can be used in schematic design of control systems (ACS) for them, as well as when estimating strong and weak functional reproducibility of managed objects and ACS is shown.*

### Key words:

*Causality, indices of causality and their definition, input-output dynamic system, automatic control system, schematic design, assessment, strong and weak functional reproducibility.*

### REFERENCES

1. Feintuch A., Saeks R. *System Theory: A Hilbert Space Approach*. New York, Academic press, 1982. 310 p.
2. Krishtal I.A. *Spektralny analiz kauzalnykh operatorov*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Spectral analysis of causality operators. Cand. phys.-math. sci. diss.]. Voronezh, 2003. 112 p.
3. Youla D.C., Carlin H.L., Castriota L.J. Bounded Real Scattering Matrices and the Foundations of Linear Passive Network Theory. *IRE Trans. Circuit Theory CT-6*, 1959, pp. 102–124.
4. Willems J.C. Stability, Instability, Invertibility and Causality. *SIAM Journal Control*, 1969, vol. 7, no. 4, pp. 645–671.
5. DeSantis R.M. Causality, Strict Causality and Invertibility for Systems in Hilbert Resolution Space. *SIAM J. Control*, 1974, vol. 12, no. 3, pp. 536–553.
6. Commault C., Lafay J.F., Malabre M. Structure of linear systems. Geometric and transfer matrix approaches. *Kybernetika*, 1991, vol. 27, no. 3, pp. 170–185.
7. Hammer J. Stabilisation of non-linear systems. *Int. J. Control*, 1986, vol. 44, no. 5, pp. 1349–1381.

8. Hammer J. Robust stabilisation of non-linear systems. *Int. J. Control*, 1989, vol. 49, no. 2, pp. 629–653.
9. Chan J.-T., Wei L.-F. Adaptive multi-channel signal tracking controller for minimum or nonminimum phase systems. *Int. J. Control*, 1989, vol. 50, no. 1, pp. 65–73.
10. Rao S.K., Chen C.-T. Design of minimal-degree compensators with assignable poles or structure. *Automatica*, 1987, vol. 23, no. 2, pp. 241–245.
11. Lee H.G., Aropostathis A., Mareus S.I. Linearisation of discrete-time systems. *Int. J. Control*, 1987, vol. 45, no. 5, pp. 1803–1822.
12. Roppenecker G., Lohmann B. Full modal synthesis of independent control [Vollständige Modale Synthese von Entkopplungsregelungen]. *Automatisierungstechnik*, 1988, vol. 36, no. 11, pp. 434–441.
13. Malyshenko A.M. *Opredelenie indeksov kauzalnosti upravlyayemykh dinamicheskikh sistem* [Determination of causality indexes of controlled dynamic systems]. *Izvestiya SA USSR. Technical cybernetics*, 1990, no. 1, pp. 32–36.
14. Streits V. *Metod prostranstva sostoyaniy v teorii diskretnykh lineynykh sistem upravleniya* [Method of state spaces in theory of digital linear control systems]. Moscow, Nauka, 1985. 296 p.
15. Hirschorn R.M., Davis J.H. Global output tracking for nonlinear systems. *SIAM J. Control and Optimization*, 1988, vol. 26, no. 6, pp. 1321–1330.
16. Malyshenko A.M. *Sistemy avtomaticheskogo upravlenniya s izbytochnoy razmernostyyu vektora upravleniya* [Automatic control systems with redundant dimension of control vector]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2005. 302 p.
17. Malyshenko A.M., Rybakov E.A., Kochetkova E.A. *Programmnoe obespechenie dlya rascheta indeksov kauzalnosti lineynykh vkhod-vykhodnykh dinamicheskikh sistem* [Software for calculating causality indexes of linear input-output dynamic systems]. State registration certificate of computer program № 2013619662, 2011.
18. Grasse K.A. Sufficient conditions for the functional reproducibility of time-varying, input-output systems. *SIAM J. Control and Optimization*, 1988, vol. 26, no. 1, pp. 230–249.
19. Wohltmann H.-W. A note Aoki's conditions for path controllability of continuous-time dynamic economic systems. *Review of Economic Studies*, 1984, vol. 51, no. 2, pp. 343–349.
20. Malyshenko A.M. *Opredelenie indeksov kauzalnosti, strukturnykh uravlyaemosti, dostizhimosti i vosstanavlevoemosti lineynykh dinamicheskikh sistem* [Definition of causality indices, structural features of controllability, observability, reachability and restorability of linear dynamic systems]. *Siberian Journal of Science*, 2011, no. 1 (1), pp. 374–378. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/77/124> (accessed 12 November 2013).

УДК 621.396.969

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ПАССИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Е.В. Рогожников, Д.Н. Ушарова, А.В. Убайчин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
E-mail: udzhon@mail.ru

Рассматриваются особенности использования сигналов современных телекоммуникационных систем в пассивных радарх. В качестве зондирующих могут быть использованы сигналы современных систем связи 4-го поколения, WiMAX, LTE, а также сигналы цифрового телевидения по стандарту DVB-T2. Рассмотрена структура кадров перечисленных систем, приведены основные параметры сигналов, такие как полоса, длительность импульса, мощность на выходе передатчика, диапазон частот, в котором работает система. Приведены основные факторы, влияющие на дальность действия системы, а также значения эффективной поверхности рассеяния целей, которые могут быть обнаружены. Получены зависимости дальности действия системы от эффективной поверхности рассеяния цели при работе по сигналам WiMAX, LTE и DVB-T2. Описаны достоинства и недостатки сигналов перечисленных систем при использовании их в пассивных радарх.

### Ключевые слова:

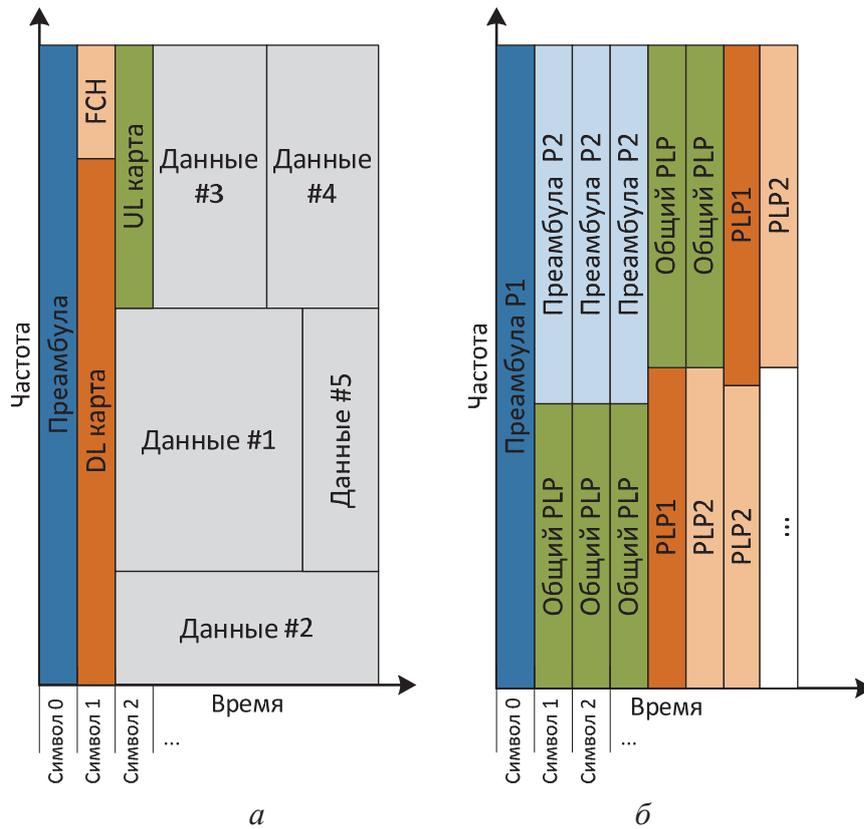
Телекоммуникационная система, пассивная радиолокационная система, дальность действия, структура кадра, сигнал синхронизации, эффективная поверхность рассеяния, разрешающая способность по дальности.

### Введение

Поверхность планеты окружает огромное множество радиосигналов различного назначения: радиовещание, сотовая связь, телевидение, сигналы спутниковой навигации, сигналы радиорелейных линий связи. Передача телекоммуникационных и других перечисленных сигналов осуществляется по беспроводным каналам связи, в результате чего при распространении сигналы отражаются от множества объектов на трассе распространения. Таким образом, сигналы известных источников могут быть использованы для получения радиолокационной информации в

пассивных радиолокационных системах. Для использования в пассивных радиолокационных системах сигналы перечисленных выше источников должны обладать следующими характеристиками:

- для выполнения обнаружения сигналы должны быть известными, для достаточной разрешающей способности по времени сигналы должны иметь полосу более 1 МГц;
- системы, сигналы которых используются в пассивной системе радиомониторинга, должны иметь антенны с широкой диаграммой направленности;



**Рис. 1.** Структура нисходящего кадра: а) Wi-Max [1]; б) DVB-T2 [2]. а) Преамбула – известная последовательность, используемая для синхронизации; FCH – управляющий заголовок кадра; DL карта – карта распределения полей нисходящего канала; UL карта – карта распределения полей восходящего кадра; Данные – пользовательские данные передаваемые в сети; б) Преамбула P1 служит для синхронизации, идентификации кадра DVB-T2; Преамбула P2 содержит информацию о кадре (длина, модуляция, скорость кодирования и т. д.); PLP – это физический канал, который может передавать один или несколько сервисов

- мощность на выходе передающей антенны должна быть достаточно высокой, для того чтобы сигналы, отраженные от цели, могли быть идентифицированы;
  - координаты источника радиоизлучения должны быть известны.
- Критериям удовлетворяют лишь сигналы сотовой связи и сигналы цифрового телевидения.

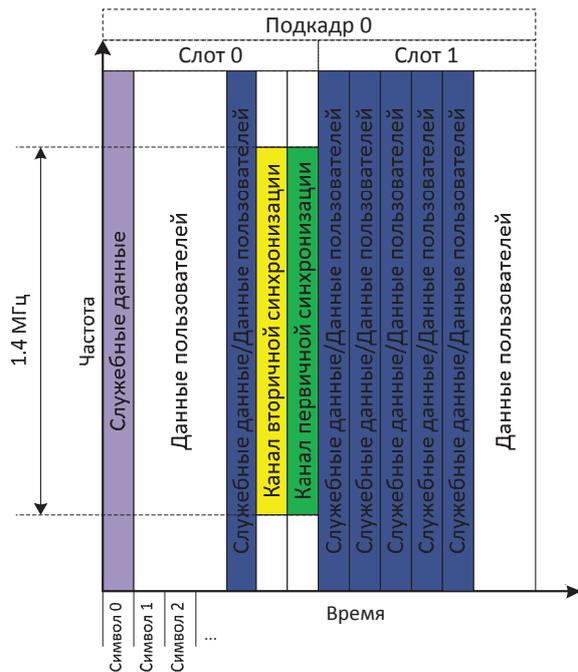
**Параметры исследуемых сигналов**

Рассмотрим сигналы современных систем связи 4-го поколения: WiMAX, LTE, а также сигналы цифрового телевидения по стандарту DVB-T2.

На рис. 1, 2 приведены структуры кадров перечисленных систем.

На рис. 2 приведена структура подкадра системы LTE [3].

Служебные данные включают в себя каналы управления передачи данных, опорные сигналы и др. Канал первичной синхронизации используется для идентификации кадра и временной синхронизации, канал вторичной синхронизации используется для определения идентификатора соты. Канал первичной и вторичной синхронизации занимает 1,4 МГц (62 поднесущие + защитные интервалы) и не зависит от используемой в системе полосы частот.



**Рис. 2.** Структура подкадра LTE

Для работы пассивной радиолокационной системы применимы следующие сигналы: преамбула Wi-MAX, преамбула P1 цифрового телевидения по стандарту DVB-T2, а также канал первичной синхронизации LTE, поскольку эти сигналы являются известными и обладают хорошими корреляционными свойствами. В табл. 1 приведены основные параметры перечисленных сигналов.

**Таблица 1.** Параметры сигналов рассматриваемых телекоммуникационных систем

	3GPP LTE	WiMAX [4]	DVB-T2 [5, 6]
Диапазон частот (зависит от страны)	2,5 ГГц	2,4 ГГц	174–834 МГц
Полоса сигнала (МГц)	1,4	1,75–28	8
Мощность сигнала (Вт)	20	20 [5]	50
Длительность импульса	71 мкс	72 мкс–1,14 мс [1]	0,1–3,5 мс
Максимальная длительность кадра (подкадра) (мс)	5	20	8–250

**Дальность действия системы**

Рассмотрим дальность действия пассивной радиолокационной системы в том случае, если приемный пункт и источник сигнала находятся в одном пункте (не разнесены), при этом источником излучаются сигналы описанных выше телекоммуникационных систем.

Дальность действия системы в свободном пространстве определяется выражением [7]:

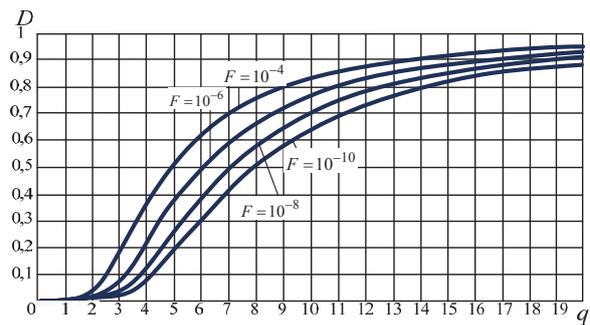
$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{P_{изл} G_{пер} \sigma_{ц} S_a}{(4\pi)^2 P_{пр\_min} L_n}}, \quad (1)$$

где  $P_{изл}$  – мощность излучаемого сигнала;  $G_{пер}$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $\sigma_{ц}$  – эффективная поверхность рассеяния цели (ЭПР);

$S_a = \frac{G_{пр} \lambda^2}{4\pi}$  – эффективная площадь приемной антенны;  $G_{пр}$  – коэффициент усиления приемной антенны;  $\lambda$  – длина волны;  $P_{пр\_min} = k_p P_{ш}$  – минимальная принимаемая мощность для выполнения критерия обнаружения;  $k_p = \frac{q_{min}^2}{2\Delta f \tau_n N}$  – коэффициент

различимости;  $q_{min}$  – параметр обнаружения, равный минимальному отношению сигнал/шум на выходе фильтра, согласованного с обнаруживаемым сигналом;  $\Delta f$  – эффективная полоса приемника;  $\tau_n$  – длительность импульса;  $N$  – количество накапливаемых импульсов;  $P_{ш} = k_{ш} T_0 k \Delta f$  – мощность шума;  $T_0$  – нормальная температура (290 К);  $k_{ш}$  – коэффициент шума приёмного тракта;  $k$  – постоянная Больцмана;  $L_n$  – дополнительные потери в системе при передаче и обработке сигнала.

Параметр обнаружения  $q_{min}$  зачастую определяется графически (рис. 3), исходя из вероятности правильного обнаружения  $D$  и ложной тревоги  $F$  [8].



**Рис. 3.** Зависимость вероятности правильного обнаружения от параметра обнаружения  $q$  при заданной вероятности ложной тревоги

Преобразуем выражение (1) к виду:

$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{2P_{имп} \tau_n N G_{пер} G_{пр} \sigma_{ц} \lambda^2}{(4\pi)^3 q_{min}^2 k_{ш} T_0 k L_n}}$$

Дальность действия системы также ограничивает затухание радиоволн в атмосфере, вызванное поглощением и рассеянием радиоволн гидрометеорами (дождь, снег, туман, град), а также поглощение радиоволн молекулами газов, составляющих воздух. С учетом затухания радиосигнала в атмосфере дальность действия системы определяется выражением [8]:

$$R_{max} = R_0 \cdot 10^{(-0,05 \cdot \alpha \cdot R_{max})}, \quad (2)$$

где  $R_0$  – дальность действия системы в свободном пространстве;  $\alpha$  – удельный коэффициент затухания (дБ/км).

Выразить из уравнения (2)  $R_{max}$  через дальность действия системы в свободном пространстве  $R_0$  и коэффициент затухания  $\alpha$  невозможно. Поэтому при практических расчетах пользуются семейством кривых  $R_{max 0} = f(R_{max}, \alpha)$ , рис. 4, а.

Из рис. 4, б следует, что на исследуемых частотах коэффициент затухания  $\alpha$  составляет порядка 0,01 дБ/км, при дальности действия пассивной радиолокационной системы до 60 км оно не окажет существенного влияния (рис. 4, а).

Помимо перечисленных факторов, одним из основных, влияющих на дальность действия системы, является эффективная поверхность рассеяния цели (ЭПР). Средние значения ЭПР типовых целей приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Среднее значение ЭПР типовых целей [9]

Пример радиолокационной цели	Средняя ЭПР, м <sup>2</sup>
Крылатая ракета	0,1
Истребитель	0,4..1
Средний реактивный пассажирский самолет	40
Большой пассажирский самолет	100
Вертолет	3
Автомобиль	10..50
Велосипед	2
Человек	1
Птица	10 <sup>-2</sup> ..10 <sup>-3</sup>

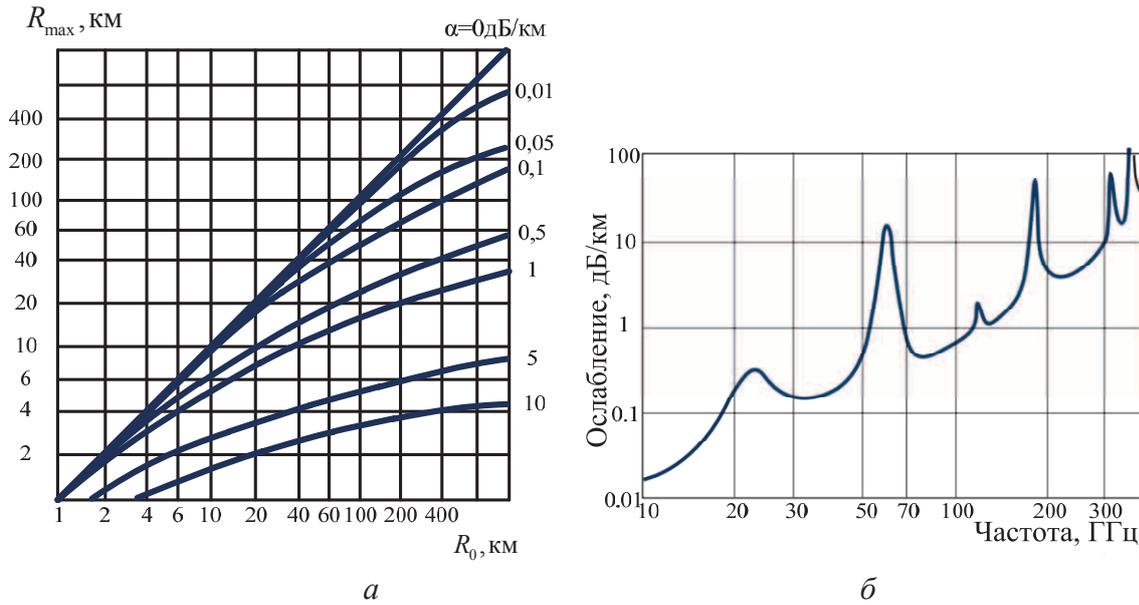


Рис. 4. Зависимости: а) дальности действия системы от коэффициента затухания [7]; б) коэффициента затухания от частоты сигнала

Параметры, используемые для расчета дальности действия системы, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры системы

	WiMax	LTE	DVB-T2
Излучаемая мощность (Вт)	15	15	50
Коэффициент усиления передающей антенны (дБ)	15	15	15
ЭПР цели	0,8–40	0,8–40	0,8–40
Несущая частота	2,4 ГГц	2,5 ГГц	834 МГц
Коэффициент усиления приемной антенны (дБ)	15	15	15
Параметр обнаружения $q_{min}$	10	10	10
Эффективная полоса приемника (МГц)	28	1,4	8
Длительность импульса (макс.)	1,14 мс	71 мкс	3,5 мс
Коэффициент шума приемного тракта (дБ)	2	2	2
Дополнительные потери в системе при передаче и обработке сигнала (дБ)	5	5	5

Зависимости дальности действия системы от ЭПР цели приведены на рис. 5.

Одной из важных характеристик системы является разрешающая способность по дальности. Разрешающая способность по дальности – минимальное расстояние между объектами, при котором дальность до каждого из них может быть измерена отдельно [8]. Разрешающая способность по дальности зависит от полосы используемого сигнала.

$$\Delta R = \frac{c \cdot \Delta \tau}{2} = \frac{c}{2 \cdot \Delta f},$$

где  $\Delta R$  – разрешающая способность по дальности;  $c$  – скорость света;  $\Delta \tau$  – разрешающая способность по времени;  $\Delta f$  – полоса сигнала.

Результаты расчета разрешающей способности и дальности действия системы приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета разрешающей способности и дальности действия системы

Сигнал	3GPP LTE	WiMAX	DVB-T2
Полоса сигнала (МГц)	1,4	28	8
Разрешающая способность (м)	107,14	5,3	18,7
Дальность действия системы (ЭПР цели 40 м²) (м)	6000	7200	19000
Частота повторения сигнала (Гц)	200	50	4..125

### Выводы

В статье рассматриваются особенности использования сигналов современных телекоммуникационных систем в пассивных радиолокационных системах. В связи с тем, что сигналы цифрового телевидения по стандарту DVB-T2 имеют большую длительность и при этом наибольшее значение мощности передатчика, они обеспечивают максимальную потенциальную дальность действия системы, при не самой лучшей разрешающей способности по дальности в 18,7 м. Сигналы WiMAX имеют максимальную полосу среди сравниваемых систем и обеспечивают наилучшую разрешающую способность по дальности в 5,3 м. Дальность действия системы, использующей сигналы LTE и WiMAX, примерно одинакова и ограничивается мощностью базовой станции и длительностью сигнала, однако использование сигналов LTE значительно ограничивает разрешающую способность по дальности, поскольку полоса сигнала синхронизации LTE составляет 1,4 МГц. При этом сигнал синхронизации LTE имеет наибольшую из рассматриваемых сигналов частоту повторения.

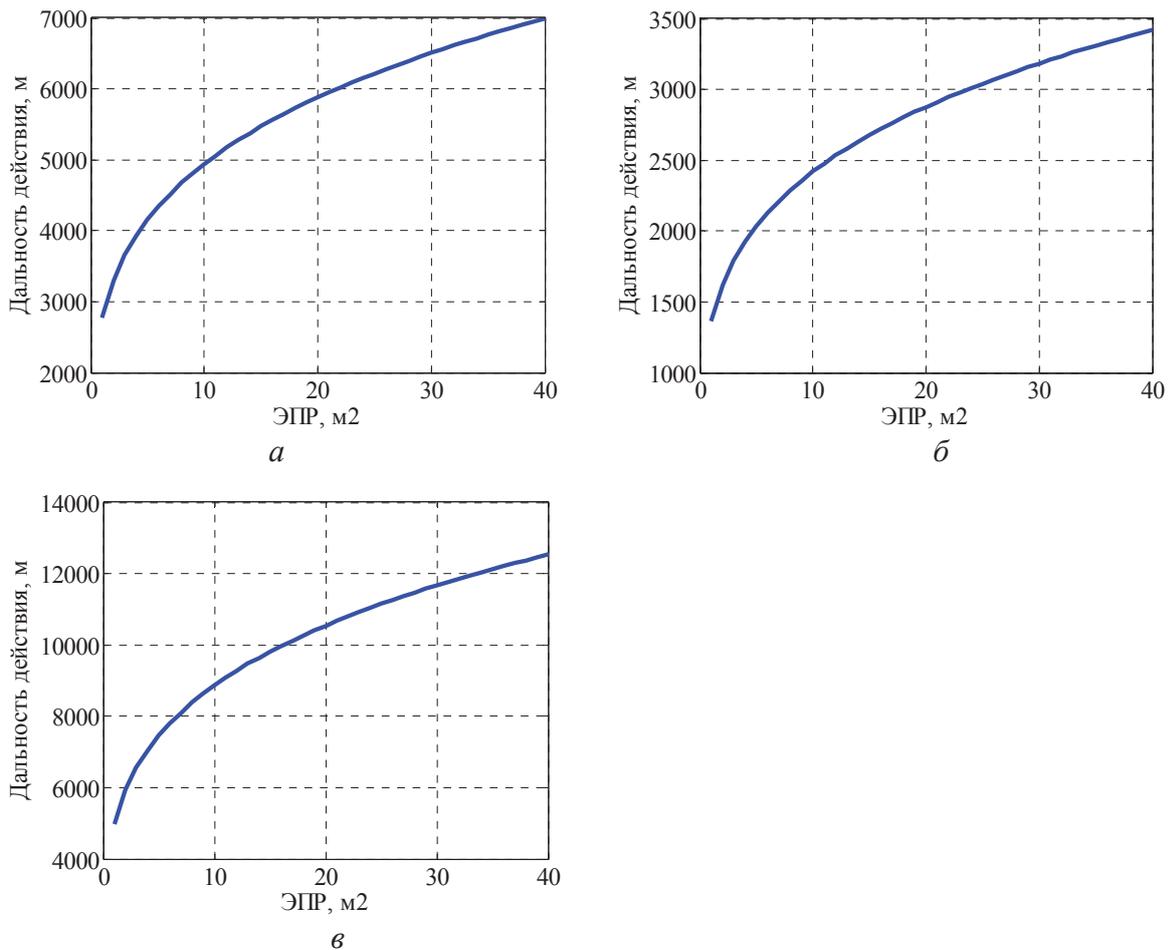


Рис. 5. Зависимость дальности действия системы от ЭПР цели при работе по сигналу: а) WiMAX; б) LTE; в) DVB-T2

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. IEEE 802.16e/D5-2004, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems – Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands. URL: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16p-2012.pdf> (дата обращения: 14.08.2013).
2. ETSI EN 302 755 v1.3.1 (2012-04) Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). URL: [http://telcogroup.ru/files/materials-pdf/DVB\\_standards/DVB-T/a122\\_DVB-T2\\_spec.pdf](http://telcogroup.ru/files/materials-pdf/DVB_standards/DVB-T/a122_DVB-T2_spec.pdf) (дата обращения: 13.08.2013).
3. ETSI TS 136 211 V9.0.0 (2010-01). URL: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136211/09.00.00\\_60/ts\\_136211v090000p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/09.00.00_60/ts_136211v090000p.pdf) (дата обращения: 10.07.2013).
4. WiMAX Forum «Mobile System Profile Specification», Release 1-IMT-2000 Edition, August 2009. URL: [http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/?les/technical\\_docu-](http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/?les/technical_docu-)

- ment/2009/07/WMF-T23-007-R010v02\_MSP-IMT-2000.pdf (дата обращения: 10.07.2013).
5. Заседание ГКРЧ от 16 марта 2012 г. URL: [http://minsvy-az.ru/common/upload/Protokol\\_12-14\\_Internet\\_isp.pdf](http://minsvy-az.ru/common/upload/Protokol_12-14_Internet_isp.pdf), (дата обращения: 19.07.2013).
6. Национальный стандарт Российской Федерации. Телевидение вещательное цифровое. URL: [http://okbalfa.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=94:dvb-t-050&catid=37:dvb-t&Itemid=71](http://okbalfa.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=94:dvb-t-050&catid=37:dvb-t&Itemid=71) (дата обращения: 21.07.2013).
7. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
8. Денисов В.П., Дудко Б.П. Радиотехнические системы. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2006. – 253 с.
9. Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T. Radar Cross Sections. – Raleigh NC: SciTech Publishing, 2004. – 637 p.

Поступила 09.09.2013 г.

## APPLICATION OF SIGNALS OF MODERN TELECOMMUNICATION SYSTEMS IN PASSIVE RADAR SYSTEMS

E.V. Rogozhnikov, D.N. Usharova, A.V. Ubauchin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

The paper considers the features of using signals of modern telecommunication systems in passive radars. The signals of modern systems of the 4<sup>th</sup> generation, WiMAX, LTE as well as digital TV signals by DVB-T2 standard may be used as sounding ones. The authors have studied the frame structure of the systems listed; the main signal parameters, such as a band, pulse duration, output power of a transmitting set, system operation frequency range were introduced. The paper presents the main factors affecting the system power budget as well as the values of radar cross section of targets which can be detected. The authors obtained the dependences of the system power budget on the target radar cross section at operation by the signals of WiMAX, LTE and DVB-T2. The highs and lows of the listed systems signals when using them in passive radars were described.

### Key words:

Telecommunication system, passive radar system, power budget, frame structure, synchronization signal, radar cross section, range resolution.

### REFERENCES

1. *IEEE 802.16e/D5-2004, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems – Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands*. Available at: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16p-2012.pdf> (accessed 14 August 2013).
2. *ETSI EN 302 755 v1.3.1 (2012-04) Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. Available at: [http://telcogroup.ru/files/materials-pdf/DVB\\_standards/DVB-T/a122\\_DVB-T2\\_spec.pdf](http://telcogroup.ru/files/materials-pdf/DVB_standards/DVB-T/a122_DVB-T2_spec.pdf) (accessed 13 August 2013).
3. *ETSI TS 136 211 V9.0.0 (2010-01)*. Available at: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136211/09.00.00\\_60/ts\\_136211v090000p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/09.00.00_60/ts_136211v090000p.pdf) (accessed 10 July 2013)
4. *WiMAX Forum Mobile System Profile Specification, Release 1-IMT-2000 Edition, August 2009*. Available at: [http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical\\_document/2009/07/WMF-T23-007-R010v02\\_MSP-IMT-2000.pdf](http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2009/07/WMF-T23-007-R010v02_MSP-IMT-2000.pdf) (accessed 10 July 2013).
5. *Zasedanie GKRCCh ot 16 marta 2012* (GKRCh meeting of March 16, 2012). Available at: [http://minsvyaz.ru/common/upload/Protokol\\_12-14\\_Internet\\_isp.pdf](http://minsvyaz.ru/common/upload/Protokol_12-14_Internet_isp.pdf), (accessed 19 July 2013).
6. *Nacionalnyy standart Rossiyskoy federatsii. Televidenie veshchatelnoe tsifrovoe* [National Standard of the Russian Federation. Digital TV broadcasting]. Available at: [http://okbalfa.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=94:dvb-t-050&catid=37:dvb-t&Itemid=71](http://okbalfa.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=94:dvb-t-050&catid=37:dvb-t&Itemid=71) (accessed 21 July 2013).
7. Kazarinov Yu.M. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio engineering systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 496 p.
8. Denisov V.P., Dudko B.P. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio engineering systems]. Tomsk, Tomsk state university of control systems and radioelectronics Publ., 2006. 253 p.
9. Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T. *Radar Cross Sections*. Raleigh NC, SciTech Publ., 2004. 637 p.

УДК 681.51: 622.73

## КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ФЛОТАЦИИ РУДЫ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

С.Ш. Баласанян, С.О. Симонян, Э.М. Геворгян

Государственный инженерный университет Армении, г. Ереван

E-mail: suni-com@syunik.am

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью повышения адекватности модели для управления процессом флотации руды. **Цель работы:** разработка обобщенной компьютерной модели для стохастического управления процессом флотации руды, учитывающей влияние показателей надежности измельчительного оборудования и характеристик исходной руды.

**Методы исследования:** методы прикладной статистики (метод экспертных оценок, методы идентификации функции распределения вероятностей, методы регрессионного анализа), методы имитационного моделирования.

**Результаты:** обоснована постановка задачи оптимального управления процессом флотации руды как задача стохастического программирования. Разработана обобщенная компьютерная модель для стохастического управления процессом флотации руды. На основе этой модели построена компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовой руды, которая учитывает влияние показателей надежности измельчительного оборудования и характеристик исходной руды на эффективность флотации. Разработанная модель включает вероятностную имитационную модель процесса возникновения отказов и восстановления измельчительного оборудования, стратифицированную модель процесса функционирования технологической системы измельчения руды и модель формирования показателя эффективности процесса флотации. В результате проведения имитационных экспериментов с разработанной компьютерной моделью определены оптимальные значения расходов реагентов и технологических параметров флотации руды. Использование в составе компьютерной модели имитационной модели технологической системы измельчения руды, учитывающей надежность измельчительного оборудования, позволяет существенно повысить адекватность компьютерной модели в целом, предоставляя возможность получения с ее помощью более точных оптимальных решений задачи стохастического управления флотационным процессом.

### Ключевые слова:

Оптимальное управление, флотация, стохастическое программирование, имитационное моделирование, надежность, измельчение руды, алгоритм.

### Введение

Как показывает практический опыт эксплуатации технологической системы измельчения руды (ТСИР), на качество ее функционирования существенное влияние оказывает надежность измельчительного оборудования [1–3]. Вследствие частых отказов мельниц, классификаторов, грунтовых насосов и другого оборудования ухудшаются выходные характеристики системы – ее производительность, гранулометрическая характеристика и плотность выходной пульпы (готового продукта). Ухудшение этих характеристик и изменение характеристик исходной руды заметно снижают точность управления и эффективность конечного процесса обогащения руды – флотации.

### Постановка задачи

Задача оптимального управления флотационным процессом традиционно сводится к детерминированной задаче математического, часто нелинейного программирования с поиском экстремума показателя эффективности – функции цели  $y=f(u,x)$  по технологическим параметрам и параметрам реагентов ( $u$ ), при заданных характеристиках исходной руды и пульпы ( $x$ ), с ограничениями на нижние и верхние значения искомым параметров [4, 5]. Однако как характеристики исходной руды, так и характеристики пульпы, определяющие состояние внешней среды, вследствие влияния ненадежности измельчительного оборудования и воз-

действия других случайных факторов являются случайными величинами. Учитывая это обстоятельство, задачу оптимального управления процессом флотации необходимо рассматривать как задачу стохастического программирования, ибо при каждом конкретном значении вектора  $u$  значения случайной функции цели  $\tilde{y}=f(u,\tilde{x})$  зависят от реализаций случайного вектора  $\tilde{x}$ . Если в результате эксперимента состояние внешней среды становится известным, т. е.  $\tilde{x}=x$ , то выбор решения  $u(x)$  при данном фиксированном значении  $x$  сводится к обычной задаче математического программирования:

$$y = f(u, x) \rightarrow \underset{u}{ext} \quad (1)$$

при ограничениях  $u \in U$ .

В общем случае эксперимент полностью не определяет состояние внешней среды, поэтому этапы выбора решений могут чередоваться с этапами наблюдений над состоянием внешней среды. Если решение  $u$  детерминированное и принимается перед тем, как наблюдается состояние  $x$ , то соотношение (1) приобретает определенный вероятностный смысл, поскольку при фиксированном  $u$  для одних  $x$ , оно может выполняться, а для других нет. Исходя из сказанного, задача оптимального управления процессом флотации руды формулируется как задача стохастического программирования [6] и сводится к отысканию экстремума математического ожидания функции цели:

$$M[f(u, \tilde{x})] \rightarrow \text{ext} \quad (2)$$

при ограничениях  $u \in U$ .

Выбор показателя эффективности технологического процесса флотации медно-молибденовой руды является одним из важнейших этапов в исследовании эффективности функционирования технологической системы обогащения руды, поскольку он оказывает существенное влияние на интерпретацию свойств системы и результатов исследований.

Анализ известных в настоящее время критериев эффективности разделительных процессов [3–5] позволяет сделать вывод, что наибольшему числу требований, предъявляемых к критериям эффективности обогатительных процессов, удовлетворяет прибыль, получаемая от всего производства концентратов. Прибыль характеризует эффективность процесса флотации с точки зрения конечной цели производства концентратов, учитывает количественные характеристики выпускаемой продукции, производственные затраты, степень извлечения полезных компонентов, качество функционирования измельчительных и других агрегатов. Прибыль учитывает также изменение рыночных условий, поскольку чувствительна к изменению цен на концентраты.

Следует отметить, что наряду с прибылью ( $\hat{y}_1$ ) эффективность флотации характеризуется рядом технологических показателей, важнейшими из которых являются среднесменное содержание Мо в молибденовом концентрате ( $y_2$ ) и извлечение молибдена ( $y_3$ ). На эти показатели, которые также зависят от векторов  $u$  и  $x$ , накладываются определенные ограничения: их значения не должны быть ниже плановых. Тогда задача оптимального управления процессом флотации, сформулированная как задача стохастического программирования (2), сводится к максимизации математического ожидания функции цели, при ограничениях, наложенных на  $u$  и на технологические показатели  $y_2, y_3$ :

$$\begin{cases} M[\hat{y}_1] = M[f_1(u, \tilde{x})] \rightarrow \max_{u \in U}, \\ y_2 = f_2(u, \tilde{x}) \geq \beta_{Mo}, \\ y_3 = f_3(u, \tilde{x}) \geq \varepsilon_{Mo}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\beta_{Mo}$  и  $\varepsilon_{Mo}$  – плановые значения содержания Мо в молибденовом концентрате и извлечения Мо (в %).

#### Компьютерная модель для стохастического управления процессом флотации

Учитывая сложность поставленной задачи, для ее решения целесообразно использовать метод имитационного моделирования. Исходя из того, что эффективность флотации в большей мере предопределяется качеством функционирования ТСИР, с целью обеспечения высокой адекватности имитационной модели процесса флотации в данной работе предлагается для формирования возможных значений выходных переменных ТСИР

использовать ее имитационную модель, учитывающую влияние показателей надежности измельчительного оборудования на качество функционирования системы. Данная модель представляет собой композицию трех моделей [7]: вероятностной имитационной модели процесса изменения работоспособности элементов ТСИР, стратифицированной модели процесса ее функционирования и модели формирования выходных интервальных характеристик ТСИР.

В соответствии с (3) математическая модель процесса флотации руды представляется совокупностью следующих функций цели и ограничений:

$$\begin{cases} \hat{y}_1 = f_1(u, x), \\ \hat{y}_2 = f_2(u, x), \\ \hat{y}_3 = f_3(u, x). \end{cases} \quad (4)$$

Укрупненная блок-схема компьютерной модели для стохастического управления процессом флотации руды с учетом надежности измельчительного оборудования приведена на рис. 1. Моделирующий алгоритм функционирует следующим образом.

После пуска имитационной программы блок 1 осуществляет ввод исходных данных моделирования, затем блок 2 в соответствии с планом компьютерного эксперимента генерирует очередное допустимое значение вектора  $u_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{mj})$ , а блок 3 устанавливает начальное значение счетчика-оператора количества реализаций модели (блок 13). После чего вступает в действие имитационная модель ТСИР, включающая вероятностную имитационную модель возникновения отказов и восстановления ее элементов (блок 4), трехуровневую иерархическую модель функционирования ТСИР (блок 5), которая формирует ее мгновенные выходные характеристики  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$  для текущего особого состояния системы (отказ или восстановление элементов). На основании мгновенных характеристик и длительностей нахождения системы в особых состояниях в течении  $i$ -й смены блок 6 формирует среднесменные значения выходных характеристик ТСИР  $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}$  для реализованной в данной смене траектории ее функционирования. После блока 7, проверяющего условие окончания очередного прогона, вступает в действие блок 8, который в соответствии с заданными оценками математических ожиданий  $\mu_i$  и среднеквадратических отклонений  $\sigma_i$  ( $i = k+1, l$ ) нормально распределенных случайных величин – характеристик исходной руды  $\tilde{x}_{k+1}, \tilde{x}_{k+2}, \dots, \tilde{x}_l$  и их корреляционной матрицей  $\|r_{ij}\|$  ( $i, j = k+1, l$ ), формирует их очередные возможные значения  $x_{(k+1)i}, x_{(k+2)i}, \dots, x_{li}$ . Затем для заданных значений векторов  $u_j$  и  $x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$  с помощью математических моделей (4) вычисляются значения технологических показателей  $\hat{y}_{2i}, \hat{y}_{3i}$  (блок 9) и проверяются условия выполнения ограничений  $\hat{y}_{2i} \geq \beta_{Mo}, \hat{y}_{3i} \geq \varepsilon_{Mo}$  (блок 10). Если условия не выполняются, вступают в действие блоки 4 и 5, которые имити-

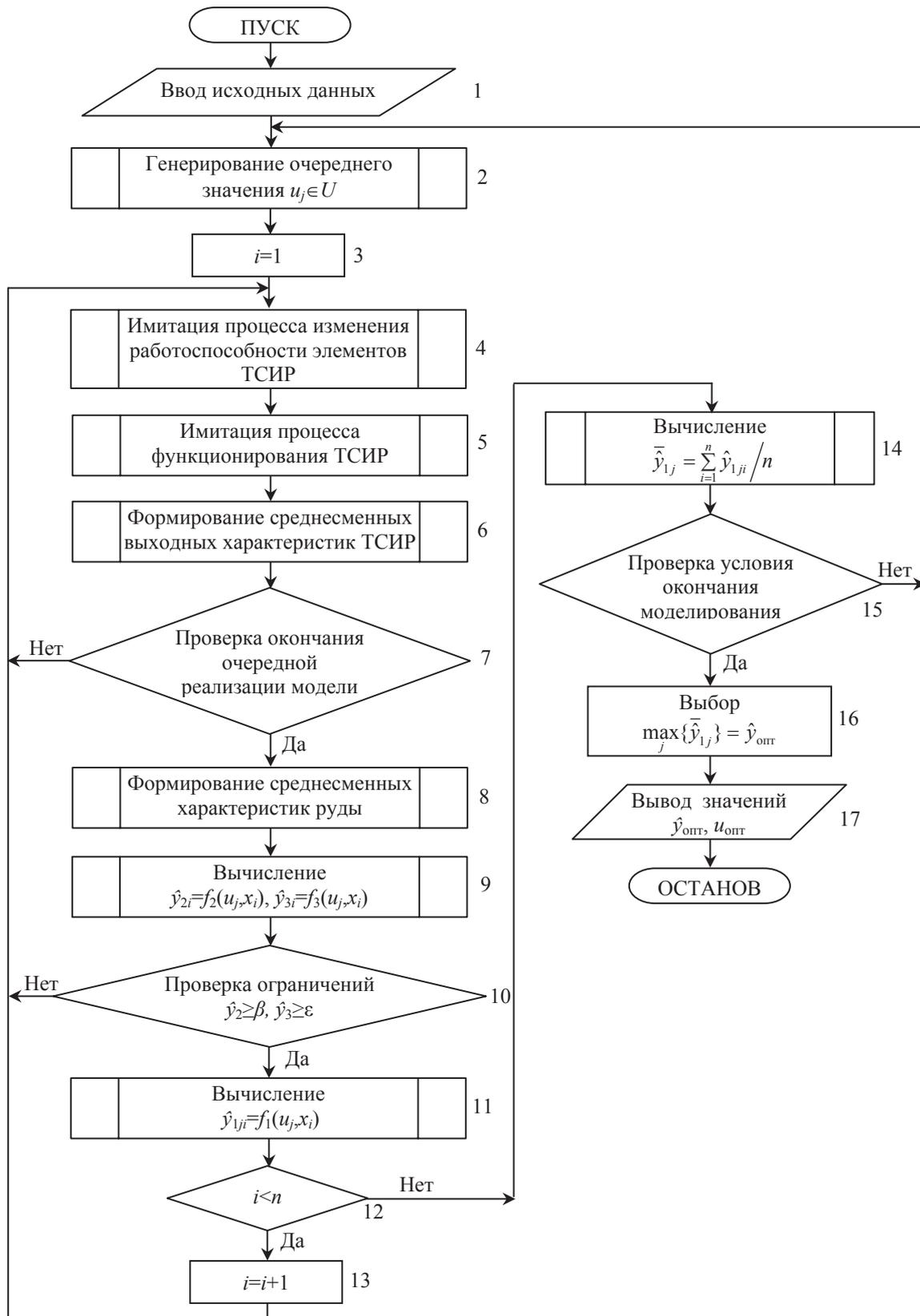


Рис. 1. Укрупненная блок-схема компьютерной модели

руют очередную реализацию процесса функционирования ТСИР в восьмичасовом интервале времени, а блок 6 формирует новые значения ее выходных интервальных характеристик. При выполнении ограничений блок 11 при заданных  $u_j$  и  $x_i$  с помощью математической модели (4) вычисляет значение прибыли (функции цели)  $\hat{y}_{ij}$ , получаемой от производства концентратов в течение  $i$ -й смены. Затем блок 12 проверяет условие окончания текущего прогона, включающего  $n$  выборочных точек – реализаций имитационной модели ТСИР в восьмичасовом интервале времени.

Затем проверяется условие окончания моделирования (блок 15). При его невыполнении управление передается блоку 2, который генерирует очередное допустимое значение вектора  $u$ . При окончании моделирования из полученных в результате значений  $\{\hat{y}_{ij}\}$  выбирается максимальное значение  $\bar{y}_{\text{опт}}$  и соответствующее им значение вектора  $u_{\text{опт}}$  (блок 16), осуществляется их вывод (блок 17), а затем и останов модели.

Следует заметить, что рассмотренная имитационная модель предназначена для перспективного управления процессом флотации. Следовательно как модель процесса флотации (4), так и функция плотности совместного распределения вероятностей характеристик исходной руды и показатели надежности измельчительного оборудования периодически уточняются на основании накопленных статистических данных.

Генерация допустимых значений вектора  $u$  может быть осуществлена в соответствии с планом экстремального компьютерного эксперимента методами полного и направленного перебора вариантов, а также с использованием оптимизационных пакетов программ (например OptQuest, PROMODEL, WITNESS Optimizer и т. п. [8]), обеспечивающих нахождение глобальных оптимальных решений задач нелинейного программирования в составе имитационной модели.

Программная реализация компьютерной модели осуществлена с использованием языка C++.

#### Практическое применение модели

Разработанная компьютерная модель использовалась для решения задачи оптимального управления технологическим процессом флотации медно-молибденовой руды Зангезурского медно-молибденового комбината (ЗАО «ЗММК», Армения).

Построению входящих в состав компьютерной модели имитационных моделей процессов изменения работоспособности измельчительного оборудования, функционирования ТСИР и модели формирования ее выходных интервальных характеристик посвящены работы [2, 7, 9].

Имитационная модель процесса изменения работоспособности элементов ТСИР [2] построена на основании статистических данных об отказах и восстановлении измельчительного оборудования, эксплуатируемого в ЗММК. При этом были идентифицированы законы распределения времени ра-

боты между соседними отказами  $\tau_p$  оборудования и времени их восстановления  $\tau_b$ . Проверка согласия эмпирических и теоретических распределений проводилась с использованием критерия согласия Пирсона (при уровне значимости  $\alpha=0,01$ ).

Аналитические выражения выявленных функций плотности распределения вероятностей  $G_i(\tau_p)$  и  $F_i(\tau_b)$  приведены в табл. 1, 2. Оценены также параметры распределений, и построены их доверительные границы.

При построения моделирующего алгоритма, учитывая сходство логической структуры и последовательности протекания во времени подпроцессов отказов и восстановления элементов, в системе выделены следующие группы элементов:

- мельницы, системы их смазки и классификаторы;
- грунтовые насосы, входящие в состав измельчительных комплексов с соотношением мельниц 1:1;
- грунтовые насосы, входящие в состав измельчительных комплексов со соотношением мельниц 2:1 и 3:1.

Выделение указанных групп позволило построить моделирующий алгоритм процесса изменения работоспособности элементов ТСИР и ее программную реализацию по модульному принципу, благодаря чему обеспечивается гибкость и компактность компьютерной модели.

Имитационная модель процесса функционирования ТСИР представляет собой трехуровневую строго-иерархическую стратифицированную систему (СИСС) [7], имитирующую функционирование системы измельчения руды на трех стратах (уровнях описания): на страте измельчительных агрегатов, на страте измельчительных комплексов и на системной страте.

#### Страта измельчительных агрегатов

На данной страте ТСИР представлена совокупностью  $p_1=15$  подсистем первого уровня – измельчительных агрегатов  $E_i^1$ ,  $i \in I^1=\{1,2,\dots,p_1\}$ , полученных в результате декомпозиции системы, состоящей из элементов  $E_i^0$ ,  $i \in I^0=\{1,2,\dots,37\}$ . Каждая подсистема  $E_i^1$  первого уровня рассмотрена как объект с двумя возможными состояниями – работоспособным (1) и отказа (0). Случайный процесс  $Y_i^1(t)$  изменения состояний каждой подсистемы  $E_i^1$  вследствие изменения работоспособности элементов рассматривается как формализованный процесс ее функционирования.

Каждая подсистема  $E_i^1$  формализована в виде временной статической системы без памяти  $S_i^1$  [7, 10], описываемой множествами моментов времени  $T_i^1$ , входных  $X_i^1$ , выходных  $Y_i^1$  сигналов и оператором  $H_i^1$ , реализующим отображением  $X_i^1 \rightarrow Y_i^1$ . Множество  $X_i^1$  представляет собой декартово произведение множеств  $\{0,1\}$  выходных сигналов входящих в состав подсистемы  $E_i^1$  элементов  $E_i^0$ , а  $T_i^1$  представляет собой множество моментов времени изменения работоспособности этих элементов.

**Таблица 1.** Функции плотностей распределения времени работы между отказами и времени восстановления мельниц

Элемент	Время работы между отказами		Время восстановления отказавшего элемента	
	Закон распределения	Аналитическое выражение функции $G(\tau_p)$	Закон распределения	Аналитическое выражение функции $F(\tau_B)$
Мельницы				
I стадии типа МШР 32×38	Эксп.	$1,925 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-1,9254 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$	Вейбулла	$0,469 \cdot \tau_B^{-0,3} \cdot \exp(-0,67 \cdot \tau_B^{0,7})$
II стадии типа МШР 32×38		$2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$		$0,4656 \cdot \tau_B^{-0,4} \cdot \exp(-0,826 \cdot \tau_B^{0,6})$
II стадии типа МШР 32×31		$2,05 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-2,05 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$		$0,48 \cdot \tau_B^{-0,4} \cdot \exp(-0,798 \cdot \tau_B^{0,6})$
I стадии типа МШР 32×31		$1,785 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-1,785 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$		$0,492 \cdot \tau_B^{-0,4} \cdot \exp(-0,82 \cdot \tau_B^{0,6})$
Самоизмельчения типа ММС 70–23		$1,81 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-1,81 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$		$0,44 \cdot \tau_B^{-0,3} \cdot \exp(-0,7 \cdot \tau_B^{0,7})$

**Таблица 2.** Функции плотностей распределения времени работы между отказами и времени восстановления оборудования ТСИР

Элемент	Время работы между отказами		Время восстановления отказавшего элемента	
	Закон распределения	Аналитическое выражение функции $G(\tau_p)$	Закон распределения	Аналитическое выражение функции $F(\tau_B)$
Классификаторы				
2КСН-24	Эксп.	$4,4 \cdot 10^{-3} \exp(-4,4 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p)$	Лог.-норм.	$\exp[-(\lg \tau_B - 0,14)^2 / 0,46] / 0,48 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_B$
КСН – 2.0		$5,2 \cdot 10^{-3} \exp(-5,2 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p)$		$\exp[-(\lg \tau_B - 0,18)^2 / 0,5] / 0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_B$
Система смазки мельниц		$2,6 \cdot 10^{-3} \exp(-2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p)$		$\exp[-(\lg \tau_B - 0,12)^2 / 0,52] / 0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_B$
Грунтовые насосы	Релея		Лог.-норм.	
8ГРТ		$\tau_p / 4225 \exp(-\tau_p^2 / 8450)$		$\exp[-(\lg \tau_B - 0,292)^2 / 0,174] / 0,285 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_B$
12ГРТ		$\tau_p / 3150 \exp(-\tau_p^2 / 6300)$		$\exp[-(\lg \tau_B - 0,4555)^2 / 0,196] / 0,313 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_B$

Множество  $Y_i^1$  выходных сигналов включает два элемента (0 – состояние отказа, 1 – работоспособное состояние). Оператор  $H_i^1$  представляет собой логическую функцию работоспособности подсистемы  $E_i^1$ , описывающую условие работоспособности данной подсистемы в зависимости от работоспособности входящих в ее состав элементов.

Страта измельчительных комплексов

На этой страте ТСИР представлена в виде совокупности  $p_2=5$  измельчительных комплексов – подсистем второго уровня  $E_i^2, i \in I^2 = \{1, 2, \dots, p_2\}$ .

Каждый измельчительный комплекс, в зависимости от работоспособности входящих в его состав или влияющих на его работу измельчительных агрегатов, может работать в одном из технологически возможных режимов, по определенной схеме измельчения. Каждый режим работы измельчительного комплекса  $E_i^2$  характеризуется конкретным набором значений его выходных характеристик  $y_i^2 = (y_{i,1}^2, y_{i,2}^2, y_{i,3}^2)$ , где  $y_{i,1}^2$  – производительность комплекса в т/ч,  $y_{i,2}^2$  – процентное содержание класса  $\leq 80$  мкм в измельченном продукте (пульпе),  $y_{i,3}^2$  – плотность выходной пульпы в г/л.

Обозначим через  $x_i^2 = (x_{i,2}^2(t), \dots, x_{i,n}^2(t))$  совокупность выходных характеристик в момент  $t$  тех измельчительных агрегатов, от работоспособности которых зависит выбор структуры и режима работы измельчительного комплекса  $E_i^2$ . В каждый момент  $t \in T^1$ , когда происходит изменение работоспособности измельчительных агрегатов, в соответствии со значением вектора  $x_i^2(t)$  происходит перестроение структуры комплекса  $E_i^2$  и переход в новый режим работы, характеризуемый новым значением вектора  $n_i^2(t)$ .

Каждый измельчительный комплекс  $E_i^2$ , формализованный в виде временной статической сис-

темы без памяти  $S_i^2$ , характеризуется четверкой  $\langle T_i^2, X_i^2, Y_i^2, H_i^2 \rangle$ . В соответствии с формальным описанием СИСС каждое множество  $T_i^2, i \in I^2$  совпадает с множеством  $T^1$ . Входной сигнал  $x_i^2(t)$  каждой  $S_i^2$  представляет собой упорядоченную совокупность выходных сигналов соответствующих подсистем первого уровня.

В качестве выходного сигнала любого элемента  $S_i^2$  рассматривается вектор выходных характеристик  $y_i^2 = (y_{i,1}^2(t), y_{i,2}^2(t), y_{i,3}^2(t))$  соответствующего измельчительного комплекса  $E_i^2$ .

Множество  $Y_i^2$  элемента  $S_i^2$  представляет собой совокупность значений вектора выходных характеристик подсистемы  $E_i^2$ , соответствующих всевозможным режимам ее работы.

Каждый оператор  $H_i^2$ , реализующий отображение  $X_i^2 \rightarrow Y_i^2$  представляет собой бинарную поисковую признаковую структуру – алгоритм, который по заданному входному сигналу  $x_i^2(t) \in X_i^2$ , описывающему работоспособность входящих в состав подсистемы  $E_i^2$ , и влияющих на ее функционирование подсистем первого уровня, осуществляет поиск и выдачу соответствующего выходного сигнала  $y_i^2(t) \in Y_i^2$ .

Системная страта

На данной страте ТСИР рассматривается как одна крупная подсистема  $E^3$  третьего уровня, представляющая собой смеситель (пульподелитель), входом которого является совокупность выходных продуктов (пульпы) всех измельчительных комплексов, а выходом – объединенная выходная пульпа, поступающая на флотацию.

Характеристики входных потоков подсистемы  $E^3$ , которые представляют собой соответствующие характеристики выходных потоков измельчительных комплексов  $E_i^2, i \in I^2$ , обозначим через

$x_{i,1}^3(t)=y_{i,1}^2(t)$  (производительность),  $x_{i,2}^3(t)=y_{i,2}^2(t)$  (процентное содержание класса  $\leq 80$  мкм в пульпе),  $x_{i,3}^3(t)=y_{i,3}^2(t)$  (плотность пульпы).

Обозначим через  $y_1^3(t)$ ,  $y_2^3(t)$ ,  $y_3^3(t)$  значения аналогичных выходных характеристик подсистемы  $E^3$  в момент времени  $t$ . Показано [7], что общая производительность  $y_1^3(t)$  подсистемы  $E^3$ , процент содержания класса  $\leq 80$  мкм  $y_2^3(t)$  в объединенной пульпе и ее плотность  $y_3^3(t)$  связаны с характеристиками измельчительных комплексов следующими соотношениями:

$$y_1^3(t) = \sum_{i=1}^{p_2} x_{i,1}^3(t), \quad (5)$$

$$y_2^3(t) = \sum_{i=1}^{p_2} x_{i,1}^3(t) \cdot x_{i,2}^3(t) / \sum_{i=1}^{p_2} x_{i,1}^3(t), \quad (6)$$

$$y_3^3(t) = \sum_{i=1}^{p_2} \frac{x_{i,1}^3(t) \cdot x_{i,3}^3(t)}{x_{i,3}^3(t) - 1000} / \sum_{i=1}^{p_2} \frac{x_{i,1}^3(t)}{x_{i,3}^3(t) - 1000}. \quad (7)$$

Соотношения (5, 6 и 7) соответственно описывают операторы  $H_1^3$ ,  $H_2^3$ ,  $H_3^3$ , составляющие оператор  $H^3$ , который реализует отображение  $X^3 \rightarrow Y^3$ .

Модель формирования выходных интервальных характеристик ТСИР [9] при заданных мгновенных значениях выходных характеристик системы измельчения и длительностей ее пребывания в особых состояниях (при возникновении отказов или восстановления оборудования) формирует среднесменные значения выходных характеристик ТСИР.

Математическая модель технологического процесса флотации (4) построена на основании статистических данных, полученных в результате технологического опробования (пассивного эксперимента) процесса флотации медно-молибденовой руды ЗММК методами пошаговой регрессии [11].

При построении математической модели технологического процесса флотации медно-молибдено-

вой руды (рис. 2) из 59 параметров процесса методом экспертных оценок [12] выбраны следующие, наиболее существенные переменные.

Входные переменные

Выходные характеристики ТСИР: расход (переработка) руды в течение смены ( $x_1$ , в тоннах), среднесменные содержания (в %) классов  $\leq 80$  мкм ( $x_2$ ) и  $\geq 160$  мкм ( $x_3$ ) в измельченном продукте (пульпе), среднесменное значение плотности пульпы ( $x_4$ , в г/л).

Характеристики исходной руды: среднесменные содержания в руде (в %) Мо общего ( $x_5$ ), Мо сульфидного ( $x_6$ ), Си общего ( $x_7$ ) и Си сульфидного ( $x_8$ ).

Управляющие переменные

Цикл коллективной флотации: среднесменные значения pH пульпы, поступающей на флотацию ( $u_1$ ), среднесменное содержание класса  $\leq 80$  мкм в сливе гидроциклонов доизмельчения ( $u_2$ , в %) и его плотности ( $u_3$ , в г/л), расход воздуха ( $u_4$ , в м<sup>3</sup>/мин), температура пульпы в флотомашине ( $u_5$ , в °С), расходы реагентов (в г/т): извести ( $u_6$ ), Na<sub>2</sub>S ( $u_7$ ), бутилового ксантогената ( $u_8$ ), вспенивателя ОПСБ или Т 92 ( $u_9$ ).

Цикл селективной (Мо) флотации: среднесменные значения температуры пропаривания ( $u_{10}$ , в °С), плотности пульпы ( $u_{11}$ , в г/л), расходов (в г/т) Na<sub>2</sub>S ( $u_{12}$ ) и керосина ( $u_{13}$ ).

Выходные переменные модели

Выход массы Мо концентрата в течение смены ( $y_1$ , в тоннах), среднесменные значения содержания Мо в молибденовом концентрате ( $y_2$ , в %), и извлечения ( $y_3$ , в %), выход массы Си концентрата ( $y_4$ , в тоннах), среднесменные значения содержания Си в медном концентрате ( $y_5$ , в %).

Статистические значения прибыли для каждой  $i$ -й смены вычисляется по формуле:

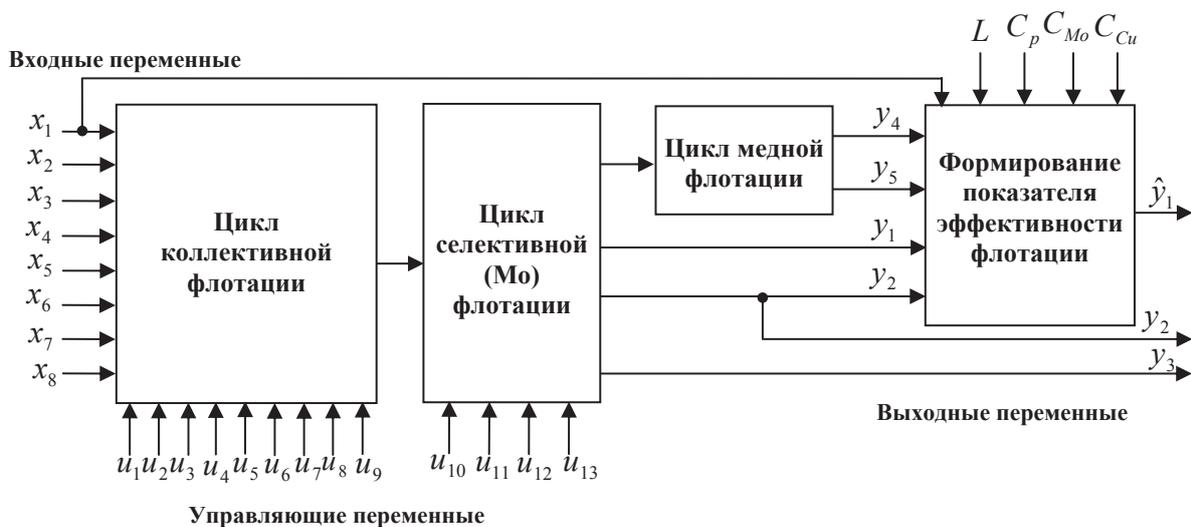


Рис. 2. Формализованная структурная схема флотационного процесса

$$\hat{y}_{1,i} = \frac{y_{1i} \cdot y_{2i}}{100} \cdot C_{Mo} + \frac{y_{4i} \cdot y_{5i}}{100} \cdot C_{Cu} - x_{1i} \cdot C_p - L,$$

где  $x_{1i}$ ,  $y_{1i}$ ,  $y_{2i}$ ,  $y_{4i}$ ,  $y_{5i}$  – значения соответствующих переменных для  $i$ -й смены,  $C_{Mo}$  и  $C_{Cu}$  – рыночные цены на молибден и медь, соответственно,  $C_p$  – затраты на переработку 1 т руды в течение смены,  $L$  – условно-постоянная часть затрат, приведенная к одной смене (в у.е.).

При использовании метода пошаговой регрессии получены линейные полиномальные регрессионные модели (4) второго порядка с коэффициентом детерминации  $R^2=0,8-0,85$  и с расчетным значением  $F$ -критерия=81–92, что свидетельствует об адекватности построенных моделей.

С использованием известных методов [8] проведена верификация и валидация разработанной компьютерной модели, как по частям, так и в целом.

В результате проведения имитационных экспериментов с разработанной моделью решена задача (3) стохастического нелинейного программирования, т. е. определены оптимальные значения управляющих переменных (расходов реагентов и технологических параметров).

Установлено также, что вследствие ненадежности измельчительного оборудования и случайного

изменения характеристик исходной руды эффективность технологического процесса флотации руды снижается соответственно на 12 и 3 %.

Рекомендуемый оптимальный реагентный режим и оптимальные значения технологических параметров обеспечивают прирост извлечения Мо и прибыли, получаемой от производства концентратов на 3...4 %.

#### Выводы

Результаты компьютерного моделирования технологического процесса флотации медно-молибденовой руды показывают, что ненадежность измельчительного оборудования существенно снижает эффективность флотации, следовательно использование в составе компьютерной модели имитационной модели ТСИР, учитывающей надежность измельчительного оборудования, позволяет существенно повысить адекватность компьютерной модели в целом, предоставляя возможность получения с ее помощью более точных оптимальных решений задачи стохастического управления флотационным процессом.

Разработанная компьютерная модель может быть использована в составе математического (программного) обеспечения разрабатываемой АСУТП флотации медно-молибденовой руды ЗММК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hulbert D.G. Simulation, control and modeling of mineral processing // Proc. of XXII IPMC. – Cape Town, South Africa, September 28 – October 3, 2003. – P. 116–126.
- Баласанян С.Ш. Компьютерная модель процесса возникновения отказов и восстановления оборудования системы измельчения руды // Цветные металлы. – 2012. – № 7. – С. 82–86.
- Авдохин В.М. Технология обогащения полезных ископаемых. – М.: МГТУ, 2008. – 320 с.
- Дэлгэрбат Л. Исследование, моделирование и оптимизация процессов измельчения и коллективной флотации медно-молибденовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ. – 2002. – № 6. – С. 213–220.
- Морозов В.В., Топчаев В.П., Улитенко К.Я., Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. – М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2013. – 512 с.
- Юдин Д.Б. Задачи и методы стохастического программирования. – М.: КРАСАНД, 2010. – 392 с.
- 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.
- Аверилл М. Лоу, Кельтон В. Девид Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. – СПб.: Питер; Киев: Изд. группа ВНУ, 2004. – 847 с.
- Баласанян С.Ш. Математическая модель формирования показателя экономической эффективности передела измельчения Каджаранской обогатительной фабрики // Обогащение руд. – 2012. – № 4. – С. 46–50.
- Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: Математические основы. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
- Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. 3-е изд. – М.: Диалектика, 2007. – 912 с.
- Орлов А.И. Теория принятия решений. – М.: Изд-во «Март», 2004. – 656 с.

Поступила 05.07.2013 г.

## COMPUTER MODEL FOR STOCHASTIC CONTROL OF THE ORE FLOTATION PROCESS CONSIDERING GRINDING EQUIPMENT RELIABILITY

S.Sh. Balasanyan, S.O. Simonyan, E.M. Gevorgyan

State Engineering University of Armenia, Yerevan

The urgency of the discussed issue is caused by the necessity to improve the adequacy of the model for the ore flotation process control. **The main aim of the study:** to develop a generalized computer model for stochastic control of the ore flotation process considering the impact of reliability parameters of grinding equipment and features of the original ore.

**The methods used in the study:** methods of applied statistics (method of the expert evaluations, methods for identification of the probability distribution function, methods of regression analysis), methods of simulation modeling.

**The results:** The statement of optimal control problem of ore flotation process is substantiated as a problem of stochastic programming. The generalized computer model is developed for stochastic control of the ore flotation process. Based on this model the authors have developed a computer model for the stochastic control of copper-molybdenum ore flotation process which takes into account the impact of reliability parameters of grinding equipment and the characteristics of the initial ore on flotation efficiency. The developed model includes the probabilistic simulation model of failure occurrences and recovery of the grinding equipment, the stratified model of functioning of ore grinding technological system and the model of formation of efficiency parameter of flotation process. As a result of carried out simulation experiments with the developed computer model the optimal values of reagents consumptions and technological parameters of ore flotation are defined. The use of simulation model of ore grinding technological system in the computer model, taking into account the reliability of the grinding equipment, allows increasing essentially the adequacy of the computer model as a whole, providing a possibility of obtaining more accurate solutions to the problem of the stochastic optimal control of flotation process.

### Key words:

Optimal control, flotation, stochastic programming, simulation, reliability, ore grinding, algorithm.

### REFERENCES

- Hulbert D.G. Simulation, control and modeling of mineral processing. *Proc. of XXII IPMC*. Cape Town, South Africa, September 28 – October 3, 2003. pp. 116–126.
- Balasanyan S.Sh. Kompyuternaya model protsessa vozniknoveniya otkazov i vosstanovleniya oborudovaniya sistemy izmelcheniya rudy [A computer model of the failure and recovery processes of ore grinding system equipment]. *Tsvetnye metally*, 2012, no. 7, pp. 82–86.
- Avdokhin V.M. *Tekhnologiya obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [The technology of mineral processing]. Moscow, MGGU Publ., 2008. 320 p.
- Delgerbat L. Issledovanie, modelirovanie i optimizatsiya protsessov izmelcheniya i kollektivnoy flotatsii medno-molibdenovykh rud [The research, modeling and optimization of the processes of grinding and bulk flotation of copper molybdenum ores]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten MGGU*, 2002, no. 6, pp. 213–220.
- Morozov V.V., Topchaev V.P., Ulitenko K.Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [The development and application of automated process control of mineral processing]. Moscow, Ruda i Metally, 2013. 512 p.
- Yudin D.B. *Zadachi i metody stokhasticheskogo programmirovaniya* [The problems and methods of the stochastic programming]. Moscow, KRASAND, 2010. 392 p.
- Balasanyan S.Sh. Stratifitsirovannaya model dlya otsenki i analiza effektivnosti funktsionirovaniya slozhnykh tekhnologicheskikh sistem so mnogimi sostoyaniyami [A stratified model for the evaluation and analysis of the functioning effectiveness of multi-state complex technological systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 25–30.
- Averill M. Lou, Kel'ton V. *Devid Imitatsionnoe modelirovanie. Klassika CS* [Simulation. Classic CS]. Saint-Petersburg, Piter; Kiev, gruppa BHV Publ., 2004. 847 p.
- Balasanyan S.Sh. Matematicheskaya model formirovaniya pokazatelya ekonomicheskoy effektivnosti peredela izmelcheniya Kadzharanskoy obogatitelnoy fabriki [Mathematical model of the grinding processing stage economic efficiency parameter forming at the Qadzharan concentrating plant]. *Obogashchenie rud*, 2012, no. 4, pp. 46–50.
- Mesarovich M., Takakhara Ya. *Obshchaya teoriya sistem: Matematicheskie osnovy* [General Systems Theory: Mathematical Foundations]. Moscow, Mir, 1978. 311 p.
- Dreyper N., Smit G. *Prikladnoy regressionnyy analiz. Mnozhestvennaya regressiya* [Applied Regression Analysis. Multiple regression]. Moscow, Dialektika, 2007. 912 p.
- Orlov A.I. *Teoriya prinyatiya resheniy* [The decision making theory]. Moscow, Mart, 2004. 656 p.

УДК 621.375.876:621.373.8:551.521

**ЛАЗЕРНЫЙ СТОР ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ**

С.М. Слободян, А.А. Цупин

Томский политехнический университет

E-mail: sms\_46@ngs.ru

*Показано, что существование санитарных норм на величину предельного уровня лазерного облучения глаз человека – оператора управления подвижным объектом (транспортным средством) – на минимальной дистанции наведения объекта, в определённой степени ограничивает предельно возможный диапазон, а значит, и дальность действия средств лазерной навигации. Дается решение этого противоречия, а именно, обеспечение наибольшей дальности действия лазерного створа с соблюдением требований, норм и правил техники безопасности на минимальной дистанции управления транспортным средством – судном, по рекомендуемой траектории. Предложен новый принцип построения лазерного створа для визуального и инструментального ориентирования подвижных объектов, реализуемый управлением параметрами лазерных лучей створа. Определены оптимальные параметры и закон изменения мощности лазерного пучка с учётом существующих норм и ограничений к воздействию на глаз оператора при визуальном ориентировании по лазерному створу.*

**Ключевые слова:**

*Лазер, створ, визуальное ориентирование, подвижный объект, воздействие на глаз.*

Несмотря на впечатляющие успехи в автоматизации управления техническими средствами не следует ожидать, что человек, как звено систем управления, особенно в области управления воздушными, водными и наземными транспортными средствами [1–6], в ближайшем будущем будет полностью заменен автоматикой. Опыт создания лазерных створов, результаты исследований и натурных испытаний при навигации судов, управляемых человеком, в условиях речных (р. Нева, Москва) и морских (порты Балтики и Черного моря) акваторий приводят к выводу, что для оптимального функционирования систем оптической и лазерной навигации, ориентирования и проводки судов, возможно и других транспортных средств, по лазерным створам необходим учет не только адаптивных способностей человека, но и его психофизиологических факторов восприятия. Один из таких факторов предельного восприятия – наличие установленных санитарными производственными нормами, безопасных для глаза-анализатора информации и датчика системы оценки навигационной обстановки уровня лазерного облучения.

Существование предельного уровня лазерного облучения глаз человека на минимальной дистанции наведения объекта в определённой степени ограничивает предельно возможный диапазон, а значит дальность действия средств лазерной навигации. Простейший путь увеличения дальности действия лазерных инструментальных средств – повышение мощности излучения лазерного створа – указателя рекомендуемой траектории движения объекта. Разрешению этого противоречия – обеспечению наибольшей дальности действия лазерного створа с соблюдением требований, норм и правил техники безопасности на минимальной дистанции управления судном по рекомендуемой траектории – и посвящена данная работа. Ниже проводится анализ одного из вариантов решения этой проблемы – путь динамического (в реальном времени) управления уровнем облучённости глаз

человека как специфического зрительного анализатора – звена системы управления подвижным транспортным средством по принципу оптической локации [1, 4].

В публикациях, например [7, 8], посвящённых управлению параметрами, в том числе мощностью лазерного излучения, не учитываются факторы, связанные с решением проблемы совместимости требований физиологии человека с наилучшим применением аппаратных лазерных средств наведения подвижного объекта, то есть не принимается во внимание специфичность психологии и зрительного восприятия лазерного излучения оператором. Для успешного расширения областей применения, в том числе [9] с повышением мощности излучения лазерных створов при навигации объектов – транспортных средств, учет реакции человека на лазерное излучение необходим. Так, при приближении объекта навигации к лазерному створу облучённость или освещённость глаз оператора, управляющего объектом, возрастает с уменьшением расстояния по квадратичному закону. Это нарушает комфортность восприятия излучения указателя направления движения, раздражает оператора и затрудняет применение эффективных лазерных навигационных средств.

Алгоритм предложенного принципа управления величиной облучения объекта наведения, управляемого человеком, с включением подвижного объекта в контур ранжирования управления уровнем мощности лазерного излучения створа может быть представлен графически схемой, приводимой на рис. 1.

Здесь:  $P(F_y)$  – мощность излучения лазерного источника створа;  $F_y = \kappa_y(F)$  – функция управления мощностью излучения лазера створа;  $P_1 = \alpha_y \kappa_y(F) P$  – мощность лазерного излучения на выходе оптического элемента, управляющего величиной лазерного сигнала;  $\alpha_y$  и  $\kappa_y(F)$  – коэффициент и функция управления величиной лазерного сигнала;  $\alpha_y P_1$  – мощность лазерного излучения на выходе створа;



зерного излучения во внешнюю среду. В настоящей работе, в отличие от известных технических решений, за основу принят критерий дистанционного динамического ранжирования уровня лазерной облучённости объекта навигации, безопасного для глаз оператора, управляющего объектом.

Для медленно движущихся объектов навигации динамику процесса управления мощностью облучения объекта лазерным створом в первом приближении можно рассматривать в статическом, «замороженном», режиме. Тогда при малой скорости перемещения объекта расстояние в интервале времени между двумя моментами облучения объекта сканирующим пучком лазерного створа типа «бегущий огонь» [1] или на интервале такта оценки отклонения величины отражённого сигнала, определяющего тактовый интервал оценки мощности сигнала не сканирующего лазерного створа, меняется несущественно. Это значит, что анализ идет при допущении малости изменения принимаемой створом мощности отражённого лазерного сигнала на интервале времени между двумя смежными выборками сигнала. Тогда в основу алгоритма управления мощностью облучения объекта (значит и глаза оператора) лазерным пучком створа с активным контуром обратной связи для регулирования выходной мощности, например, линейно поляризованного излучения лазера путем управления взаимной угловой ориентацией скрещенных поляроидов или вращения призмы Волластона, может быть положен монотонный закон управления выходной мощностью лазерного излучения.

Применим для стабилизации облучения объекта лазерным пучком створа в контуре обратной связи закон управления мощностью лазерного излучения  $\ddot{Z}+U=0$  с управляющим прозрачностью оптического тракта воздействием вида  $U=\kappa_y \dot{Z}^2+2\kappa_y \dot{Z}$ .

Дифференциальное уравнение, решение которого определяет характер изменения закономерности процесса управления мощностью лазерного излучения створа, примет вид:

$$\ddot{Z} + 2\kappa_y \dot{Z} + \kappa_y^2 Z = 0.$$

Корни его решения относительно  $\kappa_y$  для рабочей точки  $Z_0$  соответствуют средней точке диапазона регулирования:

$$Z = [Z_0 + (\dot{Z}_0 + \kappa_y Z_0)t] \exp(-\kappa_y t);$$

$$\dot{Z} = [\dot{Z}_0 - \kappa_y (\dot{Z}_0 + \kappa_y Z_0)t] \exp(-\kappa_y t).$$

Обеспечив в системе выполнение условия  $\dot{Z}_0 = -\kappa_y Z_0$ , упростим решение:

$$Z = Z_0 \exp(-\kappa_y t);$$

$$\dot{Z} = \dot{Z}_0 \exp(-\kappa_y t).$$

Отсюда  $\kappa_y = -\dot{Z}/Z$  и  $U = \kappa_y \dot{Z}$ . Полученное решение говорит о том, что величина рассогласования сигнала, соответствующего значению превышения выходной мощности лазерного излучения пучка створа относительно требуемой по нормам, и сиг-

нала управления (рис. 3), отражающего необходимую меру ослабления мощности лазерного сигнала луча створа и, следовательно, закономерность ослабления требуемой величины уровня облучения объекта навигации, плавно изменяются во времени по закону  $\exp(-\kappa_y t)$ , что соответствует аperiодическому процессу управления уровнем выходной мощности лазерного створа с нулевым перерегулированием. Экспоненциальный закон управления как плавное воздействие отрабатывается устройствами управления мощностью излучения лазерного пучка без возникновения колебаний процесса в элементах регулирования прозрачности оптического тракта и мощности лазера. Закономерность изменения мощности в координатах  $(Z; \dot{Z})$  линейная. Диапазон управления прозрачностью оптического тракта створа ограничен величиной  $U_{\max} \geq |\dot{Z}^2/Z|$ .

Найденная решением системы уравнений закономерность процесса управления облучением объекта обеспечивает изменение мощности излучения от максимального до нулевого, то есть до полного подавления лазерного сигнала. При малом значении  $\kappa_y$  время переходного процесса установки требуемой мощности лазерного излучения может быть большим. Это приводит к необходимости ограничения минимального значения  $\kappa_y$ . Увеличение коэффициента передачи контура управления облучением объекта для повышения быстродействия должно быть согласовано с уровнями установки ограничений на управление. Превышение установленного ограничения может приводить к нарушению монотонности управления, так как при неизвестных реальных условиях трудно предположить, будет ли строгое выполнение ограничений на управление [4]. Описанный алгоритм реализует пропорциональный закон управления мощностью лазерного излучения створа.

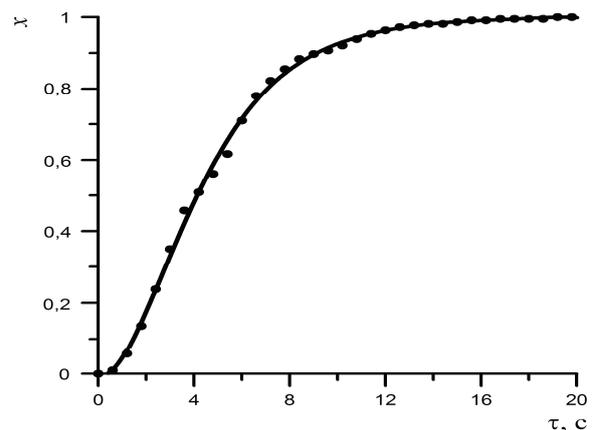
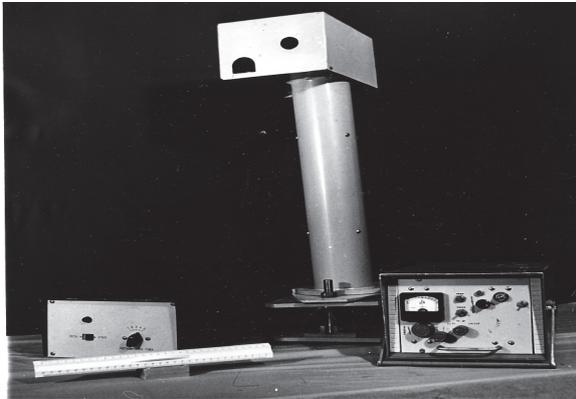


Рис. 3. Типичный вид экспоненциального закона изменения сигнала управлением устройством управления мощностью луча лазерного створа ( $x$  – скорость снижения мощности, отн. ед.;  $\tau$  – время, отн. ед.) – графическая иллюстрация поведения нормированного решения системы дифференциальных уравнений управления мощностью: сплошная линия – теоретическая; точки – данные эксперимента

Образец одного из вариантов экспериментальных макетов лазерного сканирующего маяка «ЛСМ-1», составляющего основу лазерного створа «ЛС-1», представлен на рис. 4.



**Рис. 4.** Экспериментальный образец лазерного сканирующего маяка «ЛСМ-1» – компоненты комплекса лазерных створов «ЛС-1» ориентирования транспортных средств

Закономерность процесса управления мощностью лазерного пучка, представленная решением приведённой выше аналитической системой уравнений, даёт, например, при многомерном управлении, возможность управлять, наряду с опорным уровнем начальной установки мощности лазерного излучения, фокусировкой лучей створа в качестве канала оптимального управления мощностью для повышения быстродействия всей системы в целом. Это особенно важно для снижения влияния высокочастотных составляющих спектральной плотности распределения флуктуаций мощности, из-за случайных смещений центра тяжести лучей, в том числе обусловленных стохастическим процессом перераспределения «спекл»-пятен внутри луча, которое вызвано динамикой конвективного и ветрового переноса атмосферных вихрей порядка внутреннего масштаба турбулентности через область лазерного луча. Этот же канал управления может быть использован как контур управления продольной фокусировкой лазерного луча створа и как контур компенсации влияния низкочастотной рефракционной составляющей суточного хода показателя преломления атмосферы в визуальном лазерном створе.

Таким образом, в работе исследован вариант предложенного авторами решения проблемы увеличения дальности действия лазерных средств инструментальной навигации подвижных объектов, управляемых оператором, с соблюдением норм санитарной лазерной безопасности. Сущность решения заключается в динамическом регулировании в реальном времени уровня облучённости глаз чело-

века как специфического зрительного анализатора оператора – звена системы управления подвижным транспортным средством. В основу решения положен принцип оптической локации по критерию динамического ранжирования уровня облучённости объекта, безопасного для глаз оператора, управляющего подвижным объектом.

Современная микропроцессорная техника [10] позволяет создавать достаточно простые устройства управления параметрами лазерного створа, выполняющие, кроме автоматической коррекции простейших мод искажений волнового фронта пучка, и другие функции: пространственное совмещение фронтов опорного и отраженного объектом излучения; оценку значения интенсивности турбулентности среды над водной поверхностью по структурной характеристике показателя преломления атмосферы; вычисление статистических характеристик результата воздействия среды на параметры лазерного пучка створа (статистическая обработка данных); автоматическую подстройку значений сигнала управления и его производных для достижения оптимального качества управления мощностью лазерного пучка и предотвращения срыва управления мощностью; качественное управление параметрами излучения лазерного створа на границе области устойчивости системы и другие варианты повышения качества лазерного створа, включая управление траекторией движения объектов навигации.

#### Выводы

Найден закон управления лазерным облучением подвижного объекта навигации, обеспечивающий изменение мощности излучения от максимального до нулевого уровня, то есть до полного подавления лазерного сигнала. Экспоненциальный закон управления мощностью лазерного луча створа, представленный решением системы аналитических уравнений, даёт возможность управлять, наряду с опорным уровнем начальной установки мощности лазерного излучения, фокусировкой лазерных лучей створа в качестве канала оптимального управления (усиления/ослабления) выходной мощностью лазерного створа для повышения быстродействия всей навигационной системы в целом при визуальном и инструментальном определении положения надводного подвижного объекта в процессе траекторного управления. Показано, что канал управления может быть использован как контур управления продольной фокусировкой лазерных лучей створа и как контур компенсации влияния низкочастотной рефракционной составляющей суточного хода показателя преломления атмосферы в визуальном лазерном створе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цупин А.А., Слободян С.М. Лазерные средства навигационного оборудования для ориентирования подвижных объектов. – М.: Мэйлер, 2013. – 166 с.
2. Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы наведения автономных транспортных средств // Зарубежная радиоэлектроника. – 1988. – № 6. – С. 13–20.
3. Слободян М.С., Слободян С.М., Цупин А.А. Широкоформатный лазерный створ // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 34–39.
4. Слободян С.М. Телевизионная диагностика лазерных пучков. – Барнаул: Азбука, 2006. – 224 с.
5. Цупин А.А., Слободян С.М., Шаталова Е.А. Информационные и психофизиологические аспекты восприятия судоводителями принципов лазерной навигации при проводке судов // Фундаментальные исследования. – 2009. – № 5–3. – С. 94.
6. Цупин А.А., Слободян С.М. Многофункциональные визуально-инструментальные лазерные навигационные комплексы морского применения // Фундаментальные исследования. – 2009. – № 5–3. – С. 102–103.
7. Галутва Г.В., Рязанцев А.И. Селекция типов колебаний и стабилизация частоты оптических квантовых генераторов. – М.: Связь, 1972. – 228 с.
8. Алентев Б.М. Создание измерительного лазера с нормированными энергетическими характеристиками // Измерительная техника. – 1980. – № 7. – С. 21–22.
9. Пономарев А.А., Слободян С.М. Система автоматического контроля лазерной плазмы при воздействии на материалы // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 3. – С. 62–63.
10. Бродин Б.В., Шагурин И.И. Микроконтроллеры: Справочник. – М.: ЭКОМ, 1999. – 395 с.

Поступила 01.06.2013 г.

UDC 621.375.876:621.373.8:551.521

## LASER RIVER ROUTE OF VISUAL NAVIGATION

S.M. Slobodyan, A.A. Tsupin

Tomsk Polytechnic University

*It was shown that the existing sanitary standards for the value of ultimate level of laser irradiation for man (operator of controlling dynamic object – vehicle) eyes limit to some extent the marginal and operation range of laser navigation means. This contradiction is solved – the extreme operation range of laser river route is provided with compliance with the requirements, standards and safety regulations at minimum distance of vehicle (vessel) by the specified route. The authors have proposed a new principle of designing laser river route for dynamic object vision and instrument orientation which is implemented by controlling the parameters of the river route laser rays. Optimal parameters and the law of changing the laser beam power were determined considering the existing standards and restrictions for impact on operator eyes at vision orientation by laser river route.*

### Key words:

*Laser, river route, vision orientation, dynamic object, impact on eyes.*

## REFERENCES

1. Tsupin A.A., Slobodyan S.M. *Lasernye sredstva navigatsionnogo oborudovaniya dla orientirovaniya podviznykh ob'ektov* [Laser system navigation mobile objects]. Moscow, Meyler, 2013. 166 p.
2. Slobodyan S.M., Tsupin A.A. *Lasernye navigatsionnye sistemy navedeniya avtonomnykh transportnykh sredstv* [Laser system navigation of mobile transport objects]. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1988, no. 6. pp. 13–20.
3. Slobodyan M.S., Slobodyan S.M., Tsupin A.A. *Shirokoformatnyy lasernyy stvor* [Wide laser river route]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 2, pp. 34–39.
4. Slobodyan S.M. *Televizionnaya diagnostika lasernih puchkov* [Television diagnosis of laser light]. Barnaul, Azbuka, 2006. 224 p.
5. Tsupin A.A., Slobodyan S.M., Shatalova E.A. *Informatsionnye i psikhofiziologicheskie aspekty vospriyatiya sudovoditelyami printsipov lasernoy navigatsii pri provodke sudov* [Information and psychology aspects for laser navigation]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2009, no. 5–3, pp. 94.
6. Tsupin A.A., Slobodyan S.M. *Mnogofunktsionalnyye visualno-instrumentalnye lasernye navigatsionnye komplekсы morskogo primeneniya* [Polyfunctional visual-instrument marine laser navigation complexes]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2009, no. 5–3, pp. 102–103.
7. Galutva G.V., Ryazantsev A.I. *Seleksiya tipov kolebaniy i stabilizatsiya chastot opticheskikh kvantovykh generatorov* [Mode selection and stabilization in laser]. Moscow, Svyaz, 1972. 228 p.
8. Alentev B.M. *Sozdanie izmeritelnogo lazera s normirovannymi energeticheskimi kharakteristikami* [Measurement laser of normal energy parameters]. *Measurement Techniques*, 1980, no. 7, pp. 21–22.
9. Ponomarev A.A., Slobodyan S.M. *Sistema avtomaticheskogo kontrolya lasernoy plasmy pri vozdeistvii na materialy* [Plant for the automatic control laser-induced heating of structures]. *Control. Diagnosis*, 2010, no. 3, pp. 62–63.
10. Brodin B.V., Shagurin I.I. *Mikrokontrollery: Spravochnik* [Microsystems: Handbook]. Moscow, ECOM Publ., 1999. 395 p.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ С ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТЬЮ

В.Ф. Беккер, Н.В. Бильфельд, Д.С. Камаев\*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал

\*Филиал «Ависма» ОАО «Корпорация ВСМПО-Ависма», г. Березники

E-mail: bekker@bf.pstu.ru

Рассматривается актуальная задача исследования динамики нестационарных промышленных объектов средствами и методами математического моделирования. При использовании стандартных средств моделирования из библиотеки *Simulink* отсутствует возможность изменения параметров моделируемого звена во времени в процессе решения задачи. Для устранения этого недостатка предложен способ моделирования промышленных объектов с динамически меняющимися параметрами на моделях, содержащих автономный модуль, реализующий произвольную функциональную зависимость параметров моделируемых стандартных звеньев от машинного масштаба времени. В основу моделирования положена реализация интегрирующего звена с параметром, изменяющимся во времени по определенному закону, или в зависимости от внешнего сигнала любой формы. Показан переход к моделированию инерционного звена первого, второго и более высоких порядков. Приведен пример двухпозиционной релейной стабилизации температуры воды в баке при различных внешних возмущениях в проточном реакторе идеального перемешивания. Обсуждаются результаты вычислительного эксперимента. Выявлены ограничения на области применения модели.

### Ключевые слова:

Детерминированная нестационарность, математическое моделирование, двухпозиционное регулирование, среда *Simulink*.

Промышленные объекты управления часто являются существенно нестационарными. Влияние нестационарности объекта управления на динамику системы иногда удается описать детерминированной зависимостью, которая на основе фундаментальных законов переноса массы и энергии позволяет определить скорость протекания технологического процесса, а следовательно, и кинетическое время, необходимое для достижения конечного состояния системы или завершения процесса при данной скорости. Примером такой нестационарности является промышленный аппарат вакуумной дистилляции губчатого титана, получаемого магнийтермическим восстановлением из тетрахлорида (Кролл-процесс) [1]. В этом аппарате скорость высокотемпературной отгонки примесей пропорциональна изменяющемуся во времени количеству примесей, находящимся внутри аппарата. Другим примером такой детерминированной нестационарности является высокотемпературная отгонка под вакуумом паров цинка [2].

Рассмотрим задачу исследования динамики нестационарных промышленных объектов, которые практически всегда с приемлемой для практики точностью удается описать последовательным включением нескольких инерционных звеньев первого порядка с запаздыванием [3, 4]. Выполняя последовательную декомпозицию такого объекта, получаем элементарное звено вида  $W(s)=k/(Ts+1)$ .

При моделировании в среде *Simulink* параметры звеньев задаются в меню *Parameters*. Запуская затем процесс решения модели, нужно учитывать, что в ходе вычислительного эксперимента эти параметры (в частности постоянная времени  $T$ ) сохраняют введенные изначально значения, так как в стандартном наборе средств *Simulink* отсутствует возможность изменения параметров моделируемого звена во времени. Как при моделирова-

нии в таких жестких условиях изменять свойства моделируемого объекта в процессе проведения вычислительного эксперимента?

Выход был найден с использованием стандартных блоков библиотеки *Simulink*. Рассмотрим реализацию интегрирующего звена вида  $1/Ts$  с переменным параметром  $T$  в виде произведения  $\frac{1}{Ts} = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{s}$ , в котором множитель  $1/T$  можно менять динамически, в процессе работы модели (рис. 1).

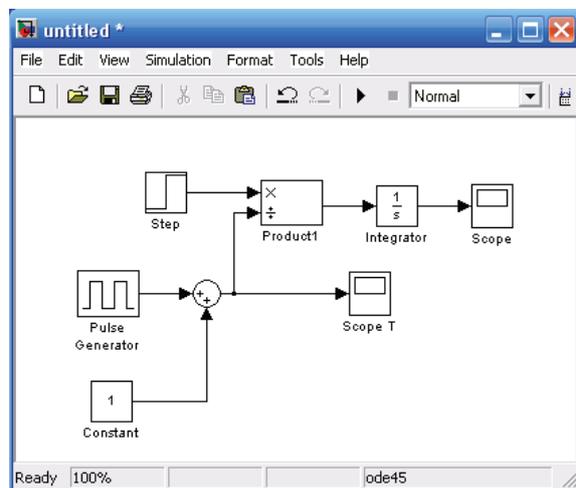


Рис. 1. Реализация в *Simulink* интегратора с переменным параметром  $T$

Здесь основной сигнал поступает с блока *Step* и представляет собой единичный скачок в момент времени  $t=1$  с. Блок *Pulse Generator* задаёт изменение параметра  $T$  с периодом 2 с и амплитудой 4, а сложение с константой 1 поставлено для того, чтобы избежать деления на ноль. То есть параметр  $T$  меняется от 1 до 5. Таким образом, нарастание сигнала на выходе интегратора будет обратно про-

порционально величине динамически изменяющегося во времени параметра  $T$ . Полученные графики представлены на рис. 2.

Важным моментом является то, что параметр  $T$  интегратора можно менять не только по заранее определённому закону, но и, например, в зависимости от выходного сигнала интегратора или любого другого блока реализуемой модели. Единственное условие, как уже отмечалось выше, нужно предусмотреть (исключить) возможность деления на ноль.

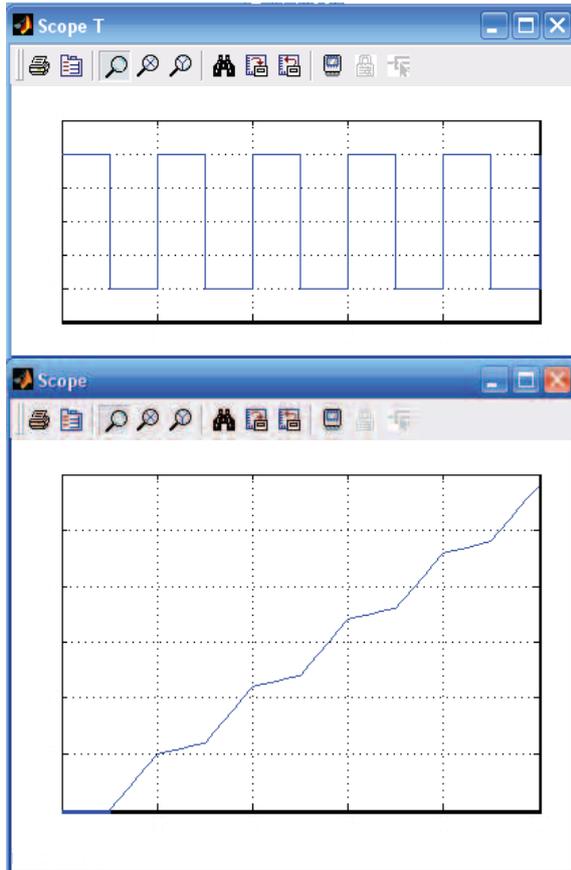


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала интегратора от параметра  $T$

Теперь рассмотрим интегрирующее звено, но с отрицательной обратной связью с коэффициентом  $k$  (рис. 3). Известно, что такой интегратор эквивалентен инерционному звену первого порядка. Покажем это.

$$W_{os}(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)W_{os}(s)},$$

$$W_{os}(s) = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{s}k} = \frac{\frac{1}{s}}{\frac{1}{s}(s+k)} = \frac{1}{k\left(\frac{1}{k}s + 1\right)} = T \frac{1}{Ts + 1} = TW_1(s),$$

где  $T=1/k$ , а  $W_1(s)$  – передаточная функция инерционного звена первого порядка.

Таким образом, чтобы выразить  $W_1(s)$  через  $W_{os}(s)$ , достаточно разделить её на параметр  $T$ . А так как в сочетании с простым интегратором мы можем динамически менять параметр  $T$ , то значит, и для инерционного звена первого порядка можем сделать то же самое.

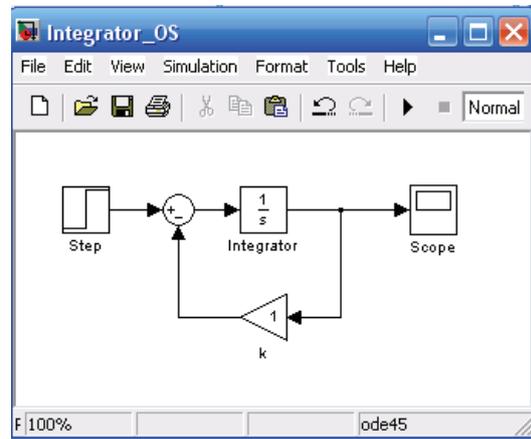


Рис. 3. Интегратор с отрицательной обратной связью

Удобно организовать такое звено в виде подпрограммы (подсистемы) – блок Subsystem из раздела Ports & Subsystems библиотеки Simulink. Пример такой реализации изображён на рис. 4.

Такая подсистема полностью идентична звену с передаточной функцией

$$W_1(s) = \frac{1}{Ts + 1}.$$

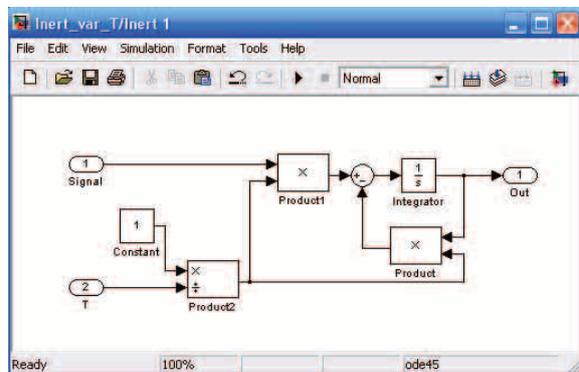


Рис. 4. Инерционное звено первого порядка с переменным параметром  $T$ , реализованное в виде модуля

Рассмотрим проточный реактор идеального перемешивания. Как известно из классического моделирования, такой реактор представляется инерционным звеном первого порядка с постоянной времени  $T$ , которая характеризует время пребывания жидкости в реакторе. Однако это справедливо, лишь когда это время действительно постоянно. А если, например, входящий поток имеет значительные колебания, или уровень жидкости (то есть фактически объём реактора) меняется? В этом случае соответственно будет меняться и «постоянная» (а фактически «переменная») времени  $T$  реактора. Поэтому будем называть её просто «параметр  $T$ » реактора.

Итак, рассмотрим случай, когда входной поток в реактор переменный. Например, бак, служащий для стабилизации температуры воды (рис. 5).

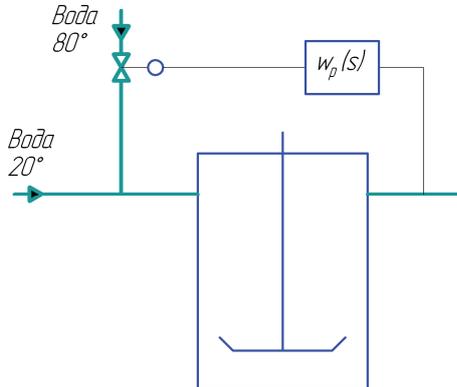


Рис. 5. Система стабилизации температуры воды в баке

Холодная вода подаётся постоянно, а подачу горячей воды регулирует двухпозиционный регулятор. Цель регулирования – поддержание температуры на выходе бака в пределах 40 ... 60 °С. Объём бака примем  $V=200$  л. Поток холодной воды  $Q_{cool}=2$  л/с, а горячей –  $Q_{hot}=10$  л/с. Исходящий поток будет равен сумме входящих. Температуры потоков примем  $T_{cool}=20$ ,  $T_{hot}=80$  °С. Модель, реализованная в *Simulink*, представлена на рис. 6.

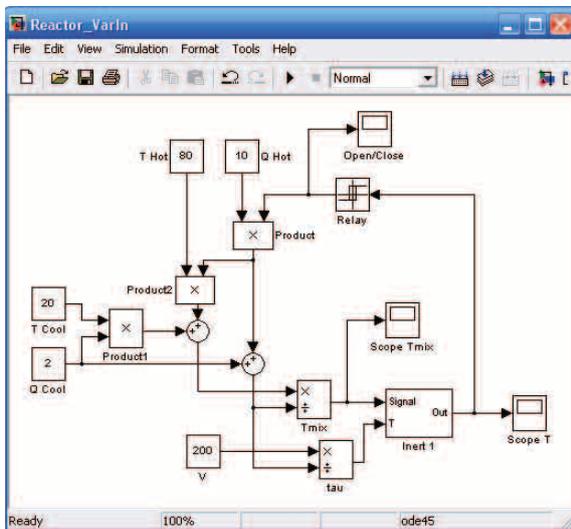


Рис. 6. Модель системы стабилизации температуры воды в баке

Температура воды после смешивания на входе в бак, принимая постоянной теплоемкость воды, будет равна

$$T_{mix} = \frac{T_{cool} \cdot Q_{cool} + T_{hot} \cdot Q_{hot}}{Q_{cool} + Q_{hot}}$$

Параметр  $T$  бака будет определяться отношением  $V/(Q_{cool}+Q_{hot})$ .

Регулятор реализован с помощью реле с гистерезисом. На его выходе формируется «1» для открытия клапана горячего потока при снижении темпе-

ратуры в баке до 40 °С, и «0» для закрытия при достижении 60 °С. Двухпозиционный регулятор здесь взят для наглядности сравнения переходных процессов при разных величинах входящего потока. Сами переходные процессы представлены на рис. 7.

Бак в этой модели представлен подсистемой *Inert1*, в которой реализована схема, изображённая на рис. 4. Начальная температура в баке принята 20 °С.

Из графиков видно, что когда клапан подачи горячей воды открыт, температура в баке изменяется гораздо быстрее, чем при закрытом клапане. Причём, даже не смотря на то, что при открытом клапане начальное отклонение температуры на входе в бак меньше ( $|70-40|^\circ\text{C} < |20-60|^\circ\text{C}$ ). Это соответствует уменьшению параметра  $T$  бака при возрастании потока.



Рис. 7. Изменение температуры в баке при разных входных потоках

Но применение блоков с переменным параметром не ограничивается инерционными звеньями первого порядка. Рассмотрим реализацию инерционного звена второго порядка с помощью того же подхода.

Звено второго порядка можно представить в виде последовательного соединения двух звеньев первого порядка:

$$W_2(s) = \frac{1}{T_1^*s^2 + T_2^*s + 1} = \frac{1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad (1)$$

или

$$W_2(s) = \frac{1}{T_1^*s^2 + T_2^*s + 1} = \frac{1}{T_1T_2s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}, \quad (2)$$

где  $W_2(s)$  – передаточная функция инерционного звена 2-го порядка;  $T_1^*$  и  $T_2^*$  – постоянные времени звена второго порядка;  $T_1$  и  $T_2$  – постоянные времени последовательных звеньев первого порядка.

Теперь, в зависимости от того, в каком виде дано исходное звено второго порядка – (1) или (2), можно смоделировать его в виде подсистемы с переменными параметрами.

Пусть звено второго порядка задано в виде (1). Тогда модель с переменными параметрами реализуется простым последовательным соединением. Пример такой подсистемы представлен на рис. 8. Особенностью этого варианта является то, что поскольку при последовательном соединении линейных звеньев их порядок не важен, параметры  $T_1$  и  $T_2$  можно менять местами.

Если же звено второго порядка задано в виде (2), и параметры  $T_1$  и  $T_2$  неизвестны, то они вычисляются из системы уравнений

$$\begin{cases} T_1 \cdot T_2 = T_1^*; \\ T_1 + T_2 = T_2^*, \end{cases}$$

которая сводится к квадратному уравнению. Решение квадратного уравнения также можно реализовать в рамках подсистемы. Пример такой реализации представлен на рис. 9.

Особенность данной реализации заключается в том, что при вычислении квадратного корня из дискриминанта блок *sqrt* не даёт ошибку при отрица-

тельном дискриминанте. То есть если  $D < 0$ , то  $\text{sqrt}(D) = -\text{sqrt}|D|$ . Поэтому вычисленные параметры  $T_1$  и  $T_2$  никогда не будут содержать мнимой части, но при  $D < 0$  они будут найдены неверно. Это нужно учитывать при выборе диапазона значений  $T_1^*$  и  $T_2^*$ , подаваемых на вход блока.

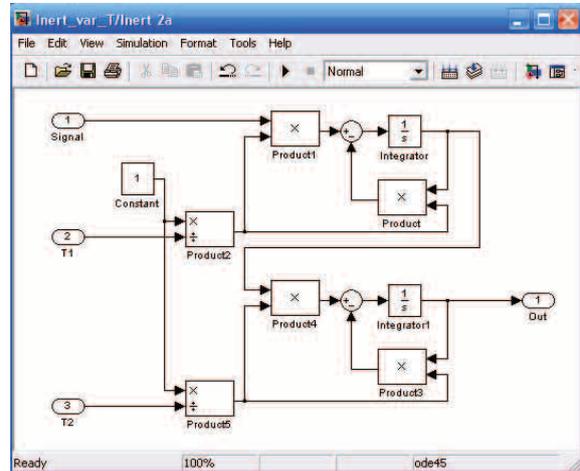


Рис. 8. Модуль реализации инерционного звена 2-го порядка при известном разложении на последовательное соединение звеньев 1-го порядка

Аналогично можно смоделировать и систему третьего порядка. Поскольку при неизвестном разложении её передаточной функции на множители решение кубического уравнения через дискриминант весьма громоздко, гораздо эффективнее использовать функцию *roots* из пакета *MatLab*. Для этого используем блок *MATLAB Function* из раздела *User-Defined Functions* библиотеки *Simulink*. На рис. 10 представлен пример реализации модели объекта с передаточной функцией вида «инер-

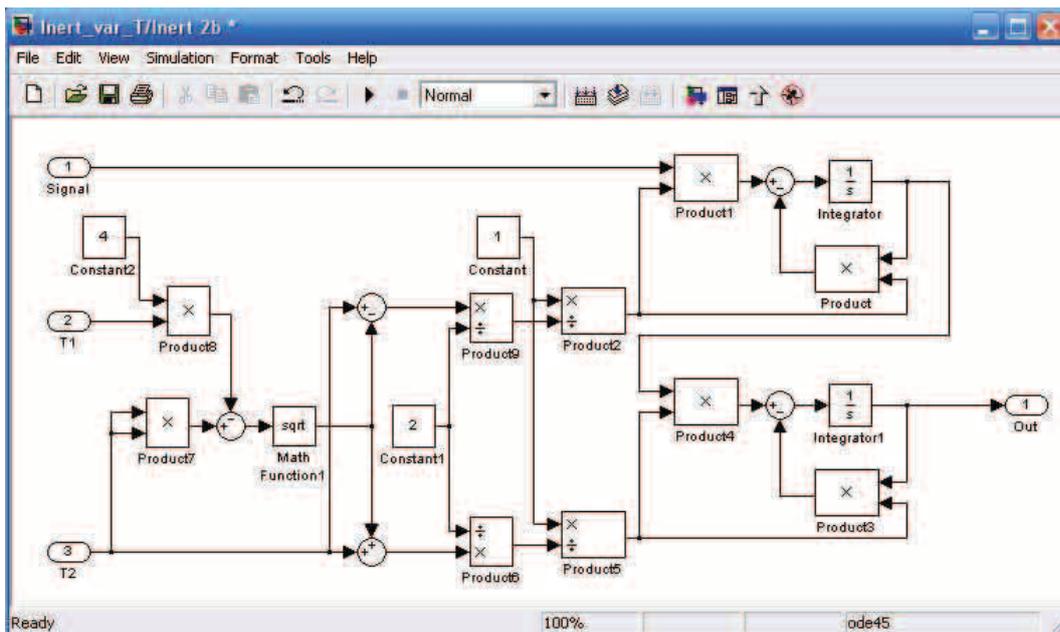


Рис. 9. Модуль реализации инерционного звена 2-го порядка при неизвестном разложении на последовательное соединение звеньев 1-го порядка

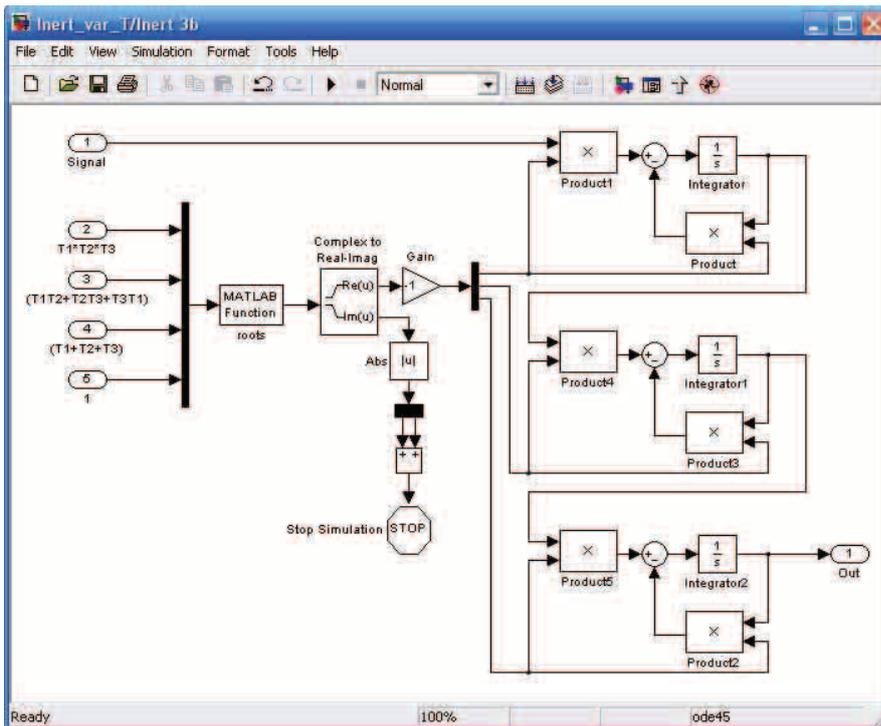


Рис. 10. Инерционное звено третьего порядка с переменными коэффициентами

ционное звено третьего порядка», когда полином третьей степени записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 W_3(s) &= \frac{1}{T_1^*s^3 + T_2^*s^2 + T_3^*s + 1} = \\
 &= \frac{1}{T_1T_2T_3s^3 + (T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3)s^2 + (T_1 + T_2 + T_3)s + 1} = \\
 &= \frac{1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)}.
 \end{aligned}$$

Подаём на соответствующие входы модели переменные параметры  $T_1^*$ ,  $T_2^*$  и  $T_3^*$ , а также константу полинома (свободный член) на вход «1». В блоке *MATLAB Function* параметры устанавливаем, как показано на рис. 11. Блок *Complex to Real-Imag* служит для отделения вещественной части корней полинома от мнимой. Дело в том, что блок *Integrator* не может работать с комплексными числами. До тех пор, пока все корни полинома вещественные, такая модель работает. Но как только появляется хоть одна пара комплексных корней, процесс моделирования принудительно останавливается, т. к. в них вещественная часть становится неравна самому корню, что ведёт к неверным результатам вычислений.

Пара мнимых корней обычно свидетельствует о наличии колебательной составляющей в объекте. На практике такие объекты встречаются не часто. В этом случае можно рекомендовать попытаться разбить передаточную функцию на две части: в одной только комплексные корни, а в другой только

мнимые. И в дальнейшем переменные параметры подавать только на чисто инерционную часть.

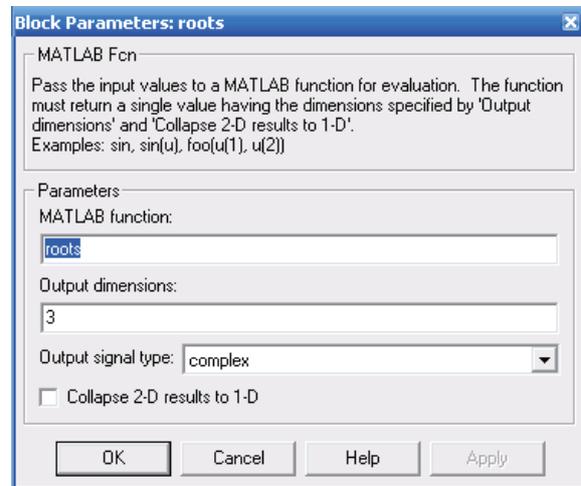


Рис. 11. Параметры блока *MATLAB Function* для звена третьего порядка

В общем случае любой полином, не содержащий комплексных корней, раскладывается на произведение множителей вида  $(Ts+1)$ , где  $T$  – вещественное число. То есть, применительно к нашим моделям, этот полином может быть представлен комбинацией интеграторов и блоков умножения. Используя при таком моделировании функцию *roots*, можно легко промасштабировать модель до любого порядка.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shibata K., Yamaguchi M., Katayama H., Tokumitsu N. Mathematical Modeling for Vacuum Distillation in the Kroll Process // *Nippon steel technical report*. – 2002. – P. 36–39.
2. Patel M.K., Bailey C., Djambazov G., Shrimpton J., Jalili V. Application of CFD in vacuum dezincing process // *Int. Conf. CFD in Minerals and Processes, CSIRO*. – Melbourne, 2003. – P. 313–318.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 396 с.
4. Затонский А.В. Синтез систем управления сложными техническими системами // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2008. – № 2. – С. 82–86.

Поступила 28.02.2013 г.

UDC 66.012–52

## SIMULATION OF INDUSTRIAL MANAGEMENT FACILITIES WITH DETERMINISTIC NONSTATIONARY

V.F. Bekker, N.V. Bilfeld, D.S. Kamaev\*

Perm National Research Polytechnic University, Berezniki branch

\*Branch «Avisma» JSC «Corporation VSMPO», Berezniki

*The authors have considered the task of studying the dynamics of the actual time-dependent industrial facilities by means and methods of mathematical modeling. When using standard modeling tools of Simulink library it is not possible to change the parameters of the simulated level while solving the problem. To overcome this limitation the authors proposed the method of modeling industrial objects with dynamically changing parameters in the models containing an autonomous module, which implements an arbitrary functional dependence of the parameters of the simulated standard units on machine time scale. The model is based on implementation of integrating link with a parameter that varies in time according to a certain law, or based on an external signal of any shape. The paper demonstrates the transition to the modeling of inertial element of the first, the second and higher orders and introduces the example of a two-stage relay stabilization of water temperature in a tank at various external perturbations in a flow reactor with ideal mixing. The results of computer simulation are discussed and the constraints to the model application areas are determined.*

#### Key words:

*Deterministic unsteadiness, mathematical simulations, two-position control, Simulink.*

#### REFERENCES

1. Shibata K., Yamaguchi M., Katayama H., Tokumitsu N. Mathematical Modeling for Vacuum Distillation in the Kroll Process. *Nippon steel technical report*, 2002, pp. 36–39.
2. Patel M.K., Bailey C., Djambazov G., Shrimpton J., Jalili V. Application of CFD in vacuum dezincing process. *Int. Conf. CFD in Minerals and Processes, CSIRO*. Melbourne, 2003, pp. 313–318.
3. Rotach V.Ya. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory]. Moscow, Publishing house MEI, 2008. 396 p.
4. Zatonsky A.V. Sintez system upravleniya slozhnymi tekhnicheskimi sistemami [Synthesis of control systems for complex technical systems]. *Gorno-analitichesky buleten – Mountain information-analytical bulletin*, 2008, no. 2, pp. 82–86.

## АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ВИБРАЦИИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В.С. Аврамчук, В.П. Казьмин

Томский политехнический университет

E-mail: avs@tpu.ru; kvp@tpu.ru

*Диагностика механизмов и систем позволяет оценить их текущее состояние и при необходимости своевременно принять меры по проведению профилактических или иных мероприятий по устранению возможных неисправностей. Диагностика механической части двигателей внутреннего сгорания, как и других механических устройств, механизмов и систем в целом, является актуальной задачей. Целью работы является исследование возможности использования частотно-временной автокорреляционной функции для анализа сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания с целью определения возможных нарушений в его работе. Показана принципиальная возможность определения характеристик процессов работы двигателя, сопровождающихся появлением в спектре вибросигнала двигателя дополнительных частотных составляющих. Частотно-временной корреляционный анализ позволяет получить из спектра сигналов вибрации двигателя дополнительную информацию о слабых периодических сигналах, характеризующих наличие каких-либо неисправностей его механической части.*

### **Ключевые слова:**

*Цифровой сигнал, корреляционный анализ, автокорреляция, двигатель внутреннего сгорания, диагностика.*

В настоящее время в большинстве случаев силовыми установками автомобилей являются двигатели внутреннего сгорания (ДВС). В них осуществляется преобразование энергии сгораемого топлива в механическую. Различают бензиновые (газовые) и дизельные двигатели. Процесс преобразования энергии в обоих типах двигателей одинаков – расширение сгораемой рабочей смеси обуславливает поступательное движение поршней в цилиндрах двигателя, которое с помощью шатунно-кривошипного механизма преобразуется во вращение коленчатого вала. С коленчатого вала снимается мощность, развиваемая двигателем.

Значительный рост числа автомобилей сопровождается не только благом для человека, но и рядом негативных последствий, в первую очередь вредными выбросами, содержащимися в отработанных газах. Это приводит к ужесточению требований к силовым установкам автомобилей. Основными мерами считаются снижение удельного расхода топлива и уменьшение выброса вредных веществ, содержащихся в выхлопных газах двигателя.

Решение указанных задач достигается как за счет совершенствования конструкции и параметров самого двигателя, так и улучшением его вспомогательных систем: подготовки и подачи рабочей смеси в цилиндры двигателя, зажигания, выпуска отработавших газов и т. п. Выполнение всевозрастающих требований достигается совершенствованием двигателя и его вспомогательных систем. Ярким примером может служить переход карбюраторных систем подготовки топливной смеси к системам впрыска топлива под компьютерным управлением.

Еще одно направление в удовлетворении возрастающих требований, предъявляемых к ДВС, – поддержание установленных технических характеристик двигателей, которое достигается его регламентным обслуживанием и диагностикой. Важность и эффективность последней меры обусловила разработку значительного числа различных методов, приборных средств, аппаратно-про-

граммных комплексов, направленных на выявление отказов или приближения к ним. Последние получили общее название «Мотор-тестеров» [1, 2]. Еще один шаг в этом же направлении – наличие встроенных в бортовой компьютер автомобиля диагностических программ, осуществляющих постоянный контроль основных параметров двигателя. При обнаружении отклонения какого-либо параметра от допустимых значений осуществляется сигнализация с помощью средств самодиагностики автомобиля (Check-Engine). Понятно, что бортовая диагностика не может обнаружить все возможные неисправности систем управления и двигателя. Это относится в первую очередь к неисправностям механических узлов. Поэтому необходимы более полные методы и средства диагностики, ориентированные на стационарное использование в условиях станций обслуживания [3]. В любых условиях одной из наиболее важных задач является диагностика состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ) [4].

В этом отношении перспективным и эффективным способом технической диагностики двигателя может оказаться частотный анализ [5, 6]. Действительно, в спектре сигнала, получаемого с любой точки двигателя, содержится информация обо всех источниках вибрации. Однако в настоящее время анализ таких сигналов затруднен, а часто невозможен из-за высокого уровня шумов, обусловленных особенностью работы двигателей [7]. Источников вибрации много: вращающиеся механизмы с узлами возвратно-поступательного действия, изменения направления движения рабочих узлов, изменяющаяся сила трения, зависящая от угла поворота узлов вращения, импульсный характер подачи и воспламенения смеси в цилиндрах и др. [8]. Они значительно усложняют анализ и интерпретацию сигналов. Поиск решений в этом направлении связан с улучшением отношения сигнал/шум и совершенствованием интерпретации получаемых сигналов на основе их обработки.

Развитые методы современной цифровой обработки сигналов позволяют значительно повысить точность решения разнообразных задач частотного анализа. В рамках таких исследований имеется направление, которое, как полагают, может привести к значительному повышению точности [9]. Подход основан на разбиении всего частотного диапазона на ряд участков, что позволяет вести обработку полного сигнала по отдельным его частям. Этот подход в сочетании с классическим корреляционным анализом позволяет улучшить отношение сигнал/шум в выделенном частотном диапазоне [10. С. 194]. В приложении к интересующей нас задаче анализа частотного спектра диагностического сигнала двигателя это дает возможность выделить слабый периодический сигнал на фоне интенсивных помех и определить его частоту [10, 11].

Рассмотрим представленный подход более подробно. Для анализа сигнала следует получить автокорреляционную функцию, используя преобразование Фурье, по выражению [12]

$$K(\tau) = F^{-1}[F(x_i)F^*(x_i)],$$

где  $F$  – прямое дискретное преобразование Фурье сигнала  $x_i$ ,  $F^*$  – комплексно-сопряженное значение результатов прямого дискретного преобразования,  $F^{-1}$  – обратное дискретное преобразование Фурье. Согласно [11] перед вычислением произведения  $F(x_i)F^*(x_i)$  предварительно формируют  $m$  его копий  $M^k$ ,  $k=0, \dots, m-1$ , обнуляя весь спектр, кроме  $k$ -й части. Результатом обратного преобразования Фурье каждой из этих копий является автокорреляционная функция на соответствующих участках. Таким образом, определяется так называемая частотно-временная автокорреляционная функция [11]. Формульная запись имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} K(f_k, t_i) &= Z_i^k, \\ Z^k &= F^{-1}[M^k], \\ M_j^k &= \begin{cases} P_j, & \frac{k}{m} \leq \frac{j}{2^{n-1}+1} < \frac{k+1}{m}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \\ P_j &= F(x_i)F^*(y_i), \end{aligned}$$

где  $x_i$  – дискретные отсчеты анализируемого сигнала,  $i=0, 1, \dots, 2^n-1$ ,  $j=0, 1, \dots, 2^{n-1}+1$ ,  $k=0, 1, \dots, m-1$ ,  $m=1, 2, \dots, 2^{n-1}$ ,  $n=2, 3, \dots$

Результаты расчета частотно-временной корреляционной функции могут быть представлены сложным вектором  $Z^k$  ( $=0, 1, 2, \dots, m-1$ ), где  $m$  – количество частотных диапазонов, каждый элемент которого представляет собой корреляционную функцию анализируемого частотного диапазона.

Для экспериментальной проверки возможности применения этого подхода к диагностике ДВС осуществлен эксперимент на двигателе ВАЗ-2101. Задача заключалась в возможности определения периодических сигналов, вызванных какой-то причиной. Такой причиной может быть неисправность двигателя. Однако более значимым будет какая-

либо регулярная основа, например вибрация, вызванная вращением коленчатого вала. В этом случае обеспечивается простота проверки частоты вращения с помощью тахометра, что дает возможность иметь «точное» решение, с которым можно сравнивать расчетное (экспериментальное) значение параметра, полученное по диагностическому сигналу. Такой сигнал, подлежащий частотно-временному корреляционному анализу, был получен с помощью вибропреобразователя ДН-3, который в двух проведенных опытах располагался соответственно в окрестностях цилиндров 1 и 4. Запись сигналов вибрации осуществлялась на портативном компьютере с интегрированным звуковым адаптером. Частота дискретизации сигнала была принята типовой и составляла 44100 Гц. Отметим, что такие адаптеры не являются лучшими, так как имеют сравнительно высокий уровень собственных шумов. Размер выборки для быстрого преобразования Фурье был определен в 32768 отсчета, интервал разбиения спектра составлял 500 Гц.

Результаты эксперимента показаны на рис. 1–3. Там приведены графики соответственно исходного сигнала, его автокорреляционной функции и частотно-временной автокорреляционной функции, полученные для первого цилиндра.

По виду автокорреляционной функции можно предположить, что периодические сигналы существуют. Предполагаемые варианты на рис. 2 отмечены стрелками. Однако достоверность вывода невысока. И уж относительно значений этих частот делать выводы еще более затруднительно, т. к. ошибка может оказаться непредсказуемой. Причина затруднений понятна – велик уровень помех. Поэтому обработка диагностического сигнала должна вестись целевым образом – на основе снижения влияния шумов.

Рассмотрим возможность решения этой задачи по частотно-временной автокорреляционной функции, которая по своей сути соответствует условию снижения уровня помех. Такая функция получена по описанному выше алгоритму и представлена на рис. 3: максимальные значения отображены черным цветом, минимальные – белым, а промежуточные значения – в градациях серого цвета. По приведенным экспериментальным результатам время одного оборота коленчатого вала составило  $T_{об} \approx 38$  мс. Следовательно, количество оборотов коленчатого вала в минуту будет примерно равно 1579 об/мин. Для сравнения: частота вращения вала по показаниям тахометра автомобиля примерно равнялась 1500 об/мин.

Полученный расчетный результат можно считать удовлетворительным, так как установлена возможность использования вибросигнала ДВС для выявления периодических составляющих сигналов, имеющих шумовые помехи на уровне, не позволяющем выявить их традиционными средствами. В то же время существует погрешность, источники которой нужно выявлять и парировать.

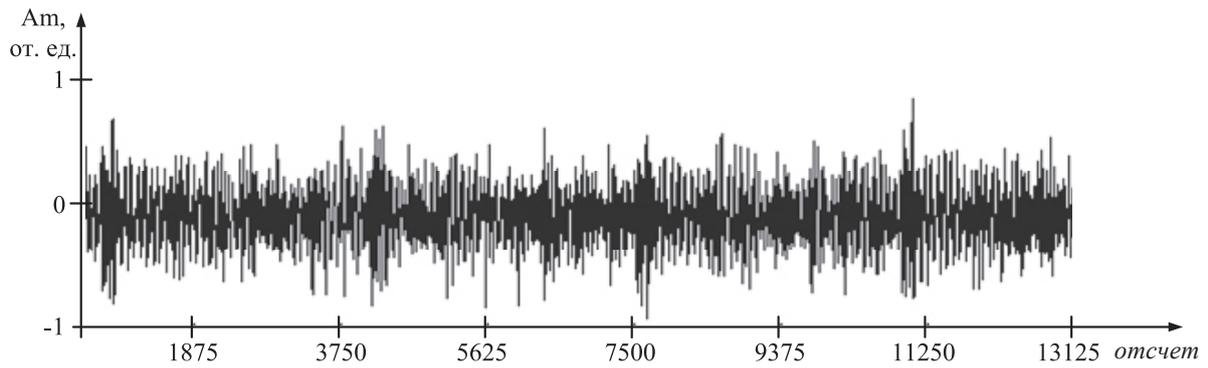


Рис. 1. Нормированный сигнал с выхода вибропреобразователя в окрестности первого цилиндра

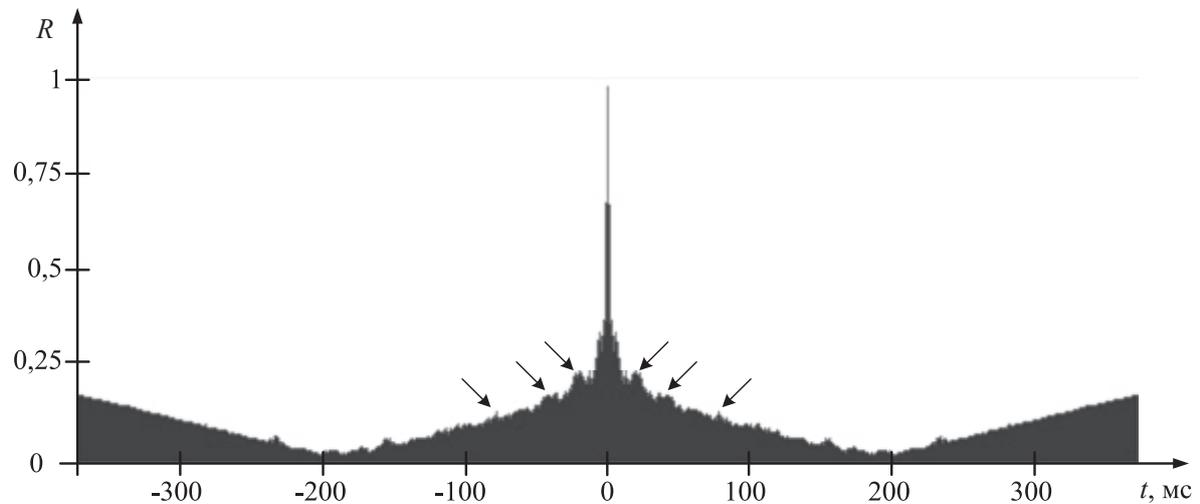


Рис. 2. Автокорреляционная функция анализируемого сигнала

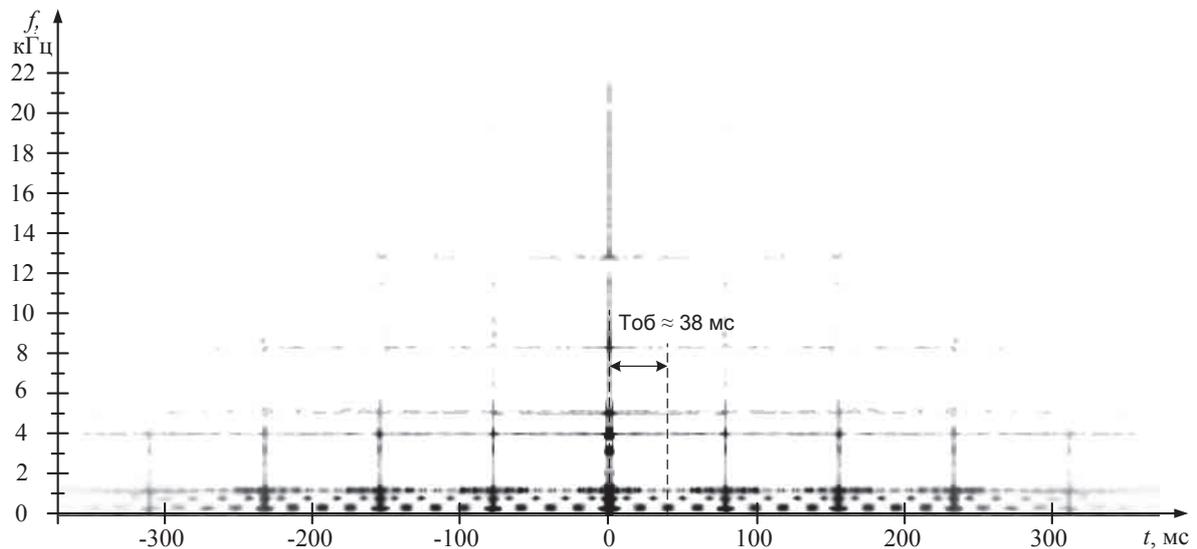


Рис. 3. Частотно-временная автокорреляционная функция анализируемого сигнала

По содержанию и форме графика на рис. 3 добавим: на мониторе такие функции имеют цветные изображения, что обеспечивает их большую информационную насыщенность. Та же функция, по-

казанная на рис. 3 в чёрно-белом изображении, имеет значительно меньшую разрешающую способность и, следовательно, существенно большую погрешность по сравнению с экраным предста-

влением. На этом основании можно утверждать, что существуют причины, устранение которых приведет к повышению точности определения периодических составляющих, вызванных, в частности, зазорами в сопрягающихся движущихся частях и другими источниками колебаний. В данном эксперименте необходимо было показать принципиальную возможность выделения таких составляющих и определения их частот. Эта задача выполнена.

Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод о том, что частотно-временная автокорреляционная функция позволяет определить не только слабые периодические сигналы, но и наличие сигналов импульсного характера (периодически возникающие источники), определить период их возникновения и их частотные диапазоны. Совместное использование результатов спектрального и частотно-временного автокорреляционного анализа позволяет выделить частотные диапазоны, в которых присутствует полезный сигнал, при необходимости настроить параметры частотных фильтров и произвести фильтрацию сигнала, а также определить гармонические составляющие, соответствующие процессам работы двигателя, например моментам воспламенения топлива в цилиндре.

Для более подробного исследования сигналов вибрации ДВС можно увеличить количество разбиений частотного спектра (уменьшить интервал разбиения спектра) и получить более полное представление о частотных свойствах сигнала. Однако при уменьшении интервала разбиения исследуемого спектра возрастает количество вычислительных процедур преобразований Фурье, что накладывает дополнительные требования к вычислительным мощностям ЭВМ или требует применения специализированных вычислительных технологий. Эти вопросы рассмотрены в [13, 14], там же предложены пути решения этой проблемы. Так что принципиальных препятствий на этом пути пока нет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахомов А.А. Применение мотортестера «MotoDос II» в диагностике отечественных автомобилей. 2007. URL: [http://www.chiptuner.ru/content/pub\\_08](http://www.chiptuner.ru/content/pub_08) (дата обращения: 10.03.2012).
2. ООО НПП «АСЕ». Оборудование для профессиональной автомобильной диагностики. URL: [http://www.acelab.ru/dep.auto/?u\\_tm\\_source=YDirect&utm\\_medium=cpc&utm\\_term=motor\\_tester&utm\\_campaign=RFnetwork](http://www.acelab.ru/dep.auto/?u_tm_source=YDirect&utm_medium=cpc&utm_term=motor_tester&utm_campaign=RFnetwork) (дата обращения: 20.02.2013).
3. Кюреган С.К. Оценка износа двигателей внутреннего сгорания методом спектрального анализа. – М.: Машиностроение, 1966. – 153 с.
4. Повреждения поршней – как выявить и устранить их. – Асперг: Kolbenschmidt Pierburg Group, 2006. – 104 с.
5. Костюков В.Н., Науменко А.П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования. – Омск: ОмГТУ, 2002. – 108 с.
6. Науменко А.П. Методология виброакустической диагностики поршневых машин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специальный выпуск. Серия Машиностроение. – 2007. – С. 85–95.

#### Выводы

В работе показана принципиальная возможность использования частотно-временной автокорреляционной функции для выявления периодически возникающих сигналов, определения периода их возникновения и частотных диапазонов, соответствующих этим сигналам. Наличие слабых гармонических составляющих в анализируемом сигнале определяется по полученной частотно-временной автокорреляционной функции и сводится к выделению на графике соответствующих линий и определению значений частот, относящихся к ним.

Использование частотно-временного корреляционного подхода при исследовании сигналов вибрации ДВС позволяет получать характеристики и показатели, отражающие, в частности, состояние механической части двигателя. Задачу диагностики можно ставить шире, анализируя также состояние и работоспособность вспомогательных систем двигателя, таких как системы зажигания, впрыска и т. д. Такие испытания можно делать для различных режимов работы двигателя, расширяя функциональные возможности подхода и диагностической аппаратуры на ее основе. В частности, важной задачей в диагностике рассматриваемых объектов является определение отклонений в работе газораспределительном механизме. В то же время эта задача интересна с позиций исследований ДВС. Дело в том, что частоты вращения коленчатого вала и вала газораспределительного механизма кратны и это делает совпадающими информационные линии на графиках рис. 3. Расшифровать такую картину оказывается непросто, но в случае положительного результата расширяются возможности анализа этой системы двигателя.

Таким образом, применение рассмотренной автокорреляционной функции расширяет область применения математического аппарата корреляционного анализа при исследовании сложных процессов, характеризующихся сигналами полигармонического и импульсного характера.

7. McKinnon I. Update International, Inc. Практический подход к анализу состояния машин возвратно-поступательного действия / пер. с англ. И.Р. Шейняка, под ред. канд. техн. наук В.А. Смирнова // Вибродиагностика для начинающих и специалистов. URL: [http://www.vibration.ru/analiz\\_mashin.shtml](http://www.vibration.ru/analiz_mashin.shtml) (дата обращения: 10.05.2010).
8. Тольский В.Е., Корчемный Л.В., Латышев Г.В., Минкин Л.М. Колебания силового агрегата автомобиля. – М.: Машиностроение, 1976. – 266 с.
9. Аврамчук В.С., Гончаров В.И., Чан Вьет Тъяу. Частотно-временной корреляционный анализ в задачах определения координат утечек в трубопроводах // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 2. – С. 70–73.
10. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х т. Пер. с франц. – М.: Мир, 1983. – Т. 1. – 312 с.
11. Аврамчук В.С. Определение наличия гармонических составляющих и их частот в дискретных сигналах на основе автокорреляционной функции // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 113–116.

12. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. – М.: Вильямс, 2008. – 992 с.
13. Лулева Е.Е., Аврамчук В.С. Технологии параллельных вычислений на многопроцессорных системах в задачах корреляционного анализа // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – № 3.1 (49). – С. 156–159.
14. Аврамчук В.С., Лулева Е.Е., Черемнов А. Г. Способы повышения эффективности вычисления быстрого преобразования Фурье // Наукоедение. – 2013 – № 3. – С. 1–6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/16tvn313.pdf> (дата обращения: 15.06.2013).

Поступила 09.07.2013 г.

UDC 519.6:004.93

## ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS OF COMBUSTION ENGINE

V.S. Avramchuk, V.P. Kazmin

Tomsk Polytechnic University

*Diagnostics of mechanisms and systems allows estimating their current state and taking measures if necessary to carry out preventive or other actions for elimination of possible malfunctions. Diagnostics of mechanical part of combustion engines, as well as other mechanical devices, mechanisms and systems as a whole, is the relevant objective. The purpose of the paper is the research of possible use of frequency-time autocorrelated function to analyze the combustion engine vibration signals for determining possible defects in its work. The paper introduces the basic possible definition of characteristics of engine operation processes, being accompanied by emergence of additional frequency components in a spectrum of engine vibrosignal. The frequency-time correlation analysis allows receiving out of spectrum of engine vibrosignal additional information on weak periodic signals characterizing existence of any malfunctions of its mechanical part.*

### Key words:

Digital signal, correlation analysis, autocorrelation, combustion engine, diagnostics.

### REFERENCES

1. Pakhomov A.A. *Primenenie motortestera «MotoDoc II» v diagnostike otechestvennykh avtomobilej avtomobilej* [Application of motortester «MotoDoc II» in diagnostics of Russian automobiles]. 2007. Available at: [http://www.chiptuner.ru/content/pub\\_08](http://www.chiptuner.ru/content/pub_08) (accessed 10 March 2012).
2. ООО NPP «ASE». *Oborudovanie dlya professionalnoj avtomobilnoj diagnostiki* [Equipment for professional automobile diagnostics]. Available at: [http://www.ancelab.ru/dep.auto/?utm\\_source=YDirect&utm\\_medium=cpc&utm\\_term=motor\\_tester&utm\\_campaign=RFnetwork](http://www.ancelab.ru/dep.auto/?utm_source=YDirect&utm_medium=cpc&utm_term=motor_tester&utm_campaign=RFnetwork) (accessed 20 February 2013).
3. Kyuregyan S.K. *Otsenka iznosa dvigateley vnutrennego sgoraniya metodom spektralnogo analiza* [Evaluation of combustion engines wear by the spectral analysis method]. Moscow, Mashinostroenie, 1966. 153 p.
4. *Povrezhdeniya porshney porshney kak vyjavit i ustranit ikh* [Damages of bucket – how to reveal and eliminate them]. Asperg, Kolbenschmidt Pierburg Group, 2006. 104 p.
5. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. *Prakticheskie osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki mashinnogo oborudovaniya* [Practical bases of vibroacoustic diagnostics of the machine equipment]. Omsk, OmGTU, 2002. 108 p.
6. Naumenko A.P. *Metodologiya vibroakusticheskoy diagnostiki porshnevykh mashin* [Methodology of vibroacoustic diagnostics of bucket cars]. *Bulletin of MGTU after N.E. Bauman. Special edition. Series Mashinostroenie*, 2007. pp. 85–95.
7. McKimmon I. Update International, Inc. *Prakticheskiy podkhod k analizu sostoyaniya mashin vozvratno-postupatel'nogo deystviya* [The practical approach to the analysis of the condition of reciprocating action machines]. Translation into English by I.R. Sheynyak. *Vibrodiagnostika dlya nachinayushchikh i spetsialistov*. [Vibrodiagnostics for beginners and specialists]. Available at: [http://www.vibration.ru/analiz\\_mashin.shtml](http://www.vibration.ru/analiz_mashin.shtml) (accessed 10 May 2010).
8. Tolskiy V.E., Korchemny L.V., Latyshev G.V., Minkin L.M. *Kolebaniya silovogo agregata avtomobilya* [Fluctuations of the power unit of the automobile]. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 266 p.
9. Avramchuk V.S., Goncharov V.I., Chan Vet Tyau. *Chastotno-vremennoy korrelyatsionny analiz v zadachakh opredeleniya koordinat utechek v truboprovodakh* [The frequency-time correlation analysis in problems of determination of coordinates of leaks in pipelines]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 2, pp. 70–73.
10. Maks Zh. *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh* [Methods and techniques for signals processing at physical measurements]. Translation from French. Moscow, Mir, 1983. Vol. 1, 312 p.
11. Avramchuk V. S. *Opredelenie nalichiya garmonicheskikh sostavlyayushchikh i ikh chastot v diskretnykh signalakh na osnove avtokorrelyatsionnoy funktsii* [Definition of existence of harmonic components and their frequencies in discrete signals on the basis of autocorrelation function]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 113–116.
12. Ayficher Je.C., Dzhervis B.U. *Cifrovaya Tsifrovaya obrabotka signalov: prakticheskiy podkhod* [Digital signal processing: practical approach]. Moscow, Williams, 2008. 992 p.
13. Luneva E.E., Avramchuk V.S. *Tekhnologii parallelnykh vychisleniy na mnogoprotsessornykh sistemakh v zadachakh korrelyatsionnogo analiza* [Technologies of parallel calculations on the multiprocessor systems in tasks of the correlation analysis]. *Control systems and information technologies*, 2012, no. 3.1 (49), pp. 156–159.
14. Avramchuk V.S., Luneva E.E., Cheremnov A. G. *Sposoby povysheniya effektivnosti vychisleniya bystrogo preobrazovaniya Furie* [Ways of efficiency increase of calculation of fast Fourier transformation]. *Naukovedenie*, 2013, no. 3. pp. 1–6. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/16tvn313.pdf> (accessed 15 June 2013).

УДК 681.5.011

**КВАЛИМЕТРИЯ ДОСТИЖИМОСТИ И ВОЗМУЩАЕМОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

А.В. Воронин

Томский политехнический университет

E-mail: voroninav@tpu.ru

Рассматриваются некоторые существующие количественные оценки управляемости и достижимости, и отмечаются их недостатки с точки зрения применимости данных оценок для решения задач синтеза систем управления. Отмечается, что существующие показатели не учитывают компромиссного характера требований к системе управления, которые включают не только хорошую отработку управляющих воздействий, но и слабую реакцию на возмущения. Отмечено, что для оценки этих свойств необходимо использовать различные количественные и структурные показатели, отражающие взаимосвязь внешних воздействий и реакций системы. С этой целью предложено сформировать на основе грамматиков управляемости и достижимости два типа количественных показателей «вход-состояние» исходя из задач терминального управления и задач синтеза слабовозмущаемых систем. Подобный же подход может быть реализован и на основе использования структурных характеристик.

**Ключевые слова:**

Количественный анализ, управляемость, линейные динамические системы, форма Хессенберга, меры управляемости, структурные индексы.

**Введение**

Управляемость и достижимость относятся к фундаментальным понятиям современной теории автоматического управления. Анализ этих свойств объекта управления позволяет делать выводы о возможности или невозможности его перевода из одного состояния в другое, т. е. в конечном счете, о возможности реализации заданных процессов в объекте и эффективности управления.

Вместе с тем интуитивно ясно, что объект в целом или отдельное направление в пространстве состояний могут быть не только, например, управляемыми или неуправляемыми, но и «хорошо управляемыми» или «плохо управляемыми», т. е. бинарная оценка указанных выше свойств, при практическом анализе и синтезе систем автоматического управления (САУ), явно недостаточна. Количественные оценки управляемости объекта могли бы быть полезны, например, при сравнительном анализе различных вариантов реализации исполнительных устройств с целью выбора наиболее эффективного.

Известно несколько вариантов количественных показателей управляемости и достижимости линейных объектов [1–3]. Подавляющее большинство исследователей понимают их как характеристики взаимосвязи двух множеств – множества  $U$  входных воздействий на систему и множества  $X$  ее состояний, т. е. как характеристики «вход-состояние», предполагая в общем случае, что чем теснее (в некотором смысле) связь  $U$  и  $X$ , тем более управляема либо достижима система. Основные различия предлагаемых показателей кроются как раз в различных способах количественных измерений этих связей. При этом существенными недостатками большинства указанных работ является абсолютизация предлагаемых показателей, а также анализ количественных аспектов рассматриваемых характеристик вне связи с задачами синтеза систем управления.

**Количественные меры управляемости и достижимости**

Пусть система описывается матричным линейным уравнением вида

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (1)$$

где  $x \in X \subset R^n$ ,  $u \in U \subset R^m$  – векторы состояния и управления системы, соответственно. В дальнейшем для данной модели будем использовать достаточно употребительное обозначение  $\Sigma(A, B)$ .

Введение количественных мер требует уточнения понятий «управляемость» и «достижимость» системы  $\Sigma(A, B)$ , а также отдельного состояния  $x_0$  в том смысле, как они будут пониматься в дальнейшем.

Будем считать, что система  $\Sigma(A, B)$  управляема, если пространство состояний  $X$  не содержит неуправляемых состояний. Состояние системы  $x_0 = x(0)$  управляемо, если из него система может быть переведена в начало координат  $x(T) = 0$  за конечное время  $T$  при конечных затратах энергии управления. Система частично управляема, если  $X$  содержит как управляемые, так и неуправляемые состояния.

Следует отметить, что использованное понятие «частичная управляемость» эквивалентно понятию «неуправляемость» в бинарном смысле. Из данного определения следует также, что свойство управляемости системы связано с возможностью решения для нее определенной финитной задачи, т. е. задачи перевода системы из одного состояния в другое.

Свойство достижимости отличается от свойства управляемости лишь тем, что рассматривается перевод системы из начала координат в состояние  $x(T)$ . При качественном анализе для непрерывных линейных систем свойства управляемости и достижимости обычно не разделяют, т. к. управляемая система или состояние достижимы и наоборот. При количественном анализе показатели управляемости и достижимости могут принципиально различаться.

Одним из наиболее известных методов количественного оценивания управляемости и достижимости линейных динамических систем является использование граммianов – матриц управляемости  $W_u(0, T)$  и достижимости  $W_r(0, T)$  первого рода

$$W_u(0, T) = \int_0^T \Phi(0, t) B B' \Phi'(0, t) dt; \quad (2)$$

$$W_r(0, T) = \int_0^T \Phi(T, t) B B' \Phi'(T, t) dt; \quad (3)$$

Известно, что если рассматривается перевод системы (1) из состояния  $(0, x_0)$  в состояние  $(T, x_1)$  оптимальным по расходу на управление образом, а именно ставится задача минимизации функционала

$$J_1 = \int_0^T u'(t) u(t) dt, \quad (4)$$

то экстремум функционала (4) при  $x_1=0$  для любого  $x_0$  определяется квадратичной формой

$$J_1 = x_0' W_u^{-1}(0, T) x_0, \quad (5)$$

где  $W_u(0, T)$  определяется согласно (2).

В [2] предложено ввести показатель управляемости  $\chi(x_0, T)$  состояния  $x_0$  как величину, обратную значению квадратичной формы (5)

$$\chi(x_0, T) = 1 / x_0' W_u^{-1}(0, T) x_0. \quad (6)$$

Количественная мера (6), определяющая минимум затрат в смысле (4) на перевод системы из состояния  $x_0$  в начало координат за время  $T$ , характеризует именно управляемость системы, так как предполагает решение финитной задачи. Данный показатель может быть вычислен только для полностью управляемой системы, поскольку требует обращения матрицы  $W_u$ .

Аналогичным образом качество системы, в смысле затрат на управление при переходе из начала координат пространства состояний в состояние  $x_0$ , можно связать со свойствами матрицы достижимости  $W_r(t_0, t_1)$ . При этом количественный показатель достижимости  $\xi(x_0, T)$  состояния  $x_0$ , определяется по выражению

$$\xi(x_0, T) = 1 / x_0' W_r^{-1}(0, T) x_0. \quad (7)$$

Наличие двух показателей  $\xi(x_0, T)$  и  $\chi(x_0, T)$  для оценки фактически одного свойства динамической системы требует обоснования их применимости.

Пусть система (1) устойчива, и время велико по сравнению с собственными постоянными времени системы. Ясно, что для такой системы затраты на переход в начало координат стремятся к нулю даже независимо от ее управляемости. Соответственно, показатель управляемости  $\chi(x_0, T)$  стремится к  $\infty$  и бесполезен для практического применения, так как не несет информации об эффективности управления. В то же время показатель  $\xi(x_0, T)$ , рассчитанный по матрице достижимости  $W_r(t_0, t_1)$ , имеет конечное значение.

Совершенно аналогичный результат может быть получен, если матрица состояния модели (1) имеет правый спектр. В этом случае при увеличении  $T$  стремится к  $\infty$  показатель  $\xi(x_0, T)$ , а показатель  $\chi(x_0, T)$  является информативным.

При наличии в спектре матрицы  $A$  как левых, так и правых полюсов целесообразным представляется формирование комплексующего показателя на основе как  $\chi(x_0, T)$ , так и  $\xi(x_0, T)$ , например, на основе методики, изложенной в [3].

Если мало, по сравнению с собственными постоянными времени системы, динамика объекта слабо влияет на характер процессов и показатели  $\chi(x_0, T)$  и  $\xi(x_0, T)$  мало отличаются друг от друга.

### Количественные меры возмущаемости линейных систем

Рассмотренная постановка финитной задачи не является единственно возможной в процедурах синтеза систем управления. Альтернативным вариантом является, в частности, синтез систем управления, в которых входные возмущающие сигналы слабо влияли бы на вектор состояния объекта  $x(t)$ . Решение этой задачи также может быть связано с характеристиками «вход–состояние», однако физический смысл показателя, определяющего данное свойство системы, должен быть иным, хотя и близким по смыслу к показателям управляемости и достижимости. Условно назовем данное свойство системы «возмущаемость», так как, характеризуя взаимодействие «вход–состояние», оно не предполагает перевода системы из одного фиксированного состояния в другое, а лишь определяет ее возможное возмущение входным сигналом. Уже из физического смысла задачи следует, что система или переменная, качественно неуправляемая, может быть хорошо возмущаемой по тому же самому набору входных сигналов.

Рассмотрим модель

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ef(t), \quad (8)$$

где  $f(t) \in F \subset R^k$  – вектор возмущающих воздействий. Учитывая, что количественные показатели взаимодействия  $X$  и  $F$  для задач синтеза слабозамуемых систем должны характеризовать возмущаемость как свойство системы изменять свое состояние под действием внешних сигналов, введем определение данного свойства, причем для системы в целом удобнее определить ее невозмущаемость.

Будем считать, что система  $\Sigma(A, E)$  невозмущаема, если  $X$  не содержит возмущаемых состояний. Состояние системы  $x_0$  является возмущаемым, если оно может быть изменено входным сигналом  $f(t) \in F$ . Система является частично возмущаемой, если пространство состояний  $X$  включает как возмущаемые, так и невозмущаемые состояния.

В качестве количественной меры возмущаемости  $\Sigma(A, E)$  по некоторому направлению, заданному вектором  $x_0$ , может быть взят предложенный в [2] показатель, имеющий смысл максимума скалярного произведения  $\langle x_0, z \rangle$  по всем  $z \in X$ , которые мо-

гут быть достигнуты за время  $T$  из нулевого начального состояния при единичных в смысле (4) затратах энергии на управление, т. е.

$$r(x_0, T) = \max \left\{ \begin{array}{l} \langle x_0, z \rangle : z = \int_0^T \Phi(T, t) Bu(t) dt; \\ \|x_0\| = 1; \int_0^T u^i(t) u(t) dt = 1 \end{array} \right\}.$$

Оптимум данного показателя равен

$$r(x_0, T) = (x_0^i W_r(x_0, T) x_0)^{1/2},$$

где  $W_r(0, T)$  определяется согласно (3). Избавившись от квадратного корня, сформируем показатель

$$\xi^*(x_0, T) = r(x_0, T)^2 = x_0^i W_r(x_0, T) x_0, \quad (9)$$

который может считаться еще одним, наряду с (7), вариантом количественного взаимодействия пространств  $X$  и  $F$ , связанным со свойствами матрицы  $W_r(0, T)$ . Однако этот показатель не связан с решением финитной задачи и не характеризует управляемость системы (8) в том смысле, как это сформулировано выше.

Для невозмущаемого состояния  $\xi^*(x_0)=0$ , что означает ортогональность вектора  $x_0$  всем  $z$ , которые могут быть достигнуты из точки  $x=0$  при заданных ресурсах входных воздействий. Для возмущаемых состояний  $\xi^*(x_0)>0$ .

Важно отметить, что введенная характеристика возмущаемости не связана обязательно с действием на систему возмущающего воздействия. Она может быть рассчитана по любому входу, как возмущающему, так и управляющему. Сам же термин связан с физическим смыслом той взаимосвязи между множествами  $X$  и  $U$ , которую она определяет.

Использование квадратичных форм (5) и (9) для формирования количественных оценок управляемости и возмущаемости позволяет ввести геометрическую трактовку этих свойств и сформировать показатели для системы в целом. Будем рассматривать свойства квадратичных форм, исходя из того, что значения вектора состояния  $x$  выбираются на сфере единичного радиуса  $\{x: \|x\|=1\}$ . В этом случае выражения (5) и (9) можно интерпретировать как отражения этой сферы на некоторые поверхности второго порядка.

Управляемость  $\chi(x, T)$  каждого направления, задаваемого вектором  $x$  в пространстве состояний, определяется как величина, обратная модулю вектора точки пересечения этого направления с данной поверхностью. Если система управляема, то поверхность, описываемая выражением (5), является действительным гиперэллипсоидом. В результате такой интерпретации количественный показатель  $\chi(x, T)$  приобретает вполне четкий геометрический смысл. Количественные же показатели для системы в целом могут быть связанными с такими инвариантами матриц  $W_u, W_u^{-1}$ , как мини-

мальное собственное значение, след или определитель.

Проанализируем общность и различия двух характеристик  $\xi(x_0, T)$  и  $\xi^*(x_0, T)$  взаимодействия «вход-состояние» на нескольких элементарных примерах. Пусть модель первого порядка имеет вид

$$\dot{x} = -ax + bu, \quad a > 0.$$

Тогда

$$W(0, T) = \int_0^T e^{-a(T-t)} b b e^{-a(T-t)} dt = \frac{b^2}{2a} (1 - e^{-2aT}).$$

Показатель достижимости переменной  $x=1$  и системы в целом вычисляется по выражению

$$\xi(0, T) = \frac{1}{x^i W_r^{-1}(0, T) x} = \frac{b^2}{2a} (1 - e^{-2aT}).$$

Легко заметить, что численно точно таким же будет для данной системы и показатель возмущаемости, хотя физический смысл показателей различен. Для достижимости это минимум затрат в смысле интеграла от  $u^2(t)$  на перевод объекта в единичное состояние. Для возмущаемости это корень квадратный из максимального отклонения при единичных затратах. Как и следовало ожидать, для системы 1-го порядка эти показатели равнозначны.

Перейдем теперь к системе 2-го порядка, заданной в модальном базисе

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} -a_1 & 0 \\ 0 & -a_2 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} u, \quad a_1, a_2 > 0.$$

Система управляема при  $a_1 \neq a_2$ . Матрица достижимости имеет вид

$$W_r(0, T) = \begin{pmatrix} \frac{b_1^2}{2a_1} (1 - e^{-2a_1 T}) & \frac{b_1 b_2}{a_1 + a_2} (1 - e^{-(a_1 + a_2) T}) \\ \frac{b_1 b_2}{a_1 + a_2} (1 - e^{-(a_1 + a_2) T}) & \frac{b_2^2}{2a_2} (1 - e^{-2a_2 T}) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

обратная матрица достижимости –

$$W_r^{-1}(0, T) = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \frac{b_2^2 l_2}{2a_2} & \frac{-b_1 b_2 l_{12}}{a_1 + a_2} \\ \frac{-b_1 b_2 l_{12}}{a_1 + a_2} & \frac{b_1^2 l_1}{2a_1} \end{pmatrix}.$$

Здесь приняты обозначения

$$l_1 = 1 - e^{-2a_1 T}, \quad l_2 = 1 - e^{-2a_2 T}, \quad l_{12} = 1 - e^{-(a_1 + a_2) T},$$

$$\Delta = \frac{b_1^2 b_2^2}{4a_1 a_2} l_1 l_2 - \frac{b_1^2 b_2^2}{(a_1 + a_2)^2} l_{12}^2.$$

Показатель достижимости первой моды можно записать в виде

$$\xi_1 = \frac{b_1^2 l_1}{2a_1} - \frac{2b_1^2 a_2}{(a_1 + a_2)} \frac{l_{12}^2}{l_2} = \hat{\xi}_1 - \Delta \xi_1,$$

где  $\xi_1^*$  – показатель достижимости данной моды как отдельной системы 1-го порядка, а элемент  $\Delta\xi_1$  является добавкой, обусловленной наличием в системе второго собственного движения. Так как для устойчивой системы величина  $\Delta\xi_1$  всегда больше нуля, наличие второй моды может лишь уменьшить достижимость  $\xi_1^*$  по сравнению с тем значением, которое она бы имела как отдельная система первого порядка. Аналогичные выводы можно сделать и относительно влияния первой моды на достижимость второй, так как обе моды равноправны.

Иная картина имеет место для возмущаемости. Из выражения (10) для  $W_f(0, T)$  следует, что наличие в системе второго собственного движения не влияет на возмущаемость первой моды, которая равна

$$\xi_1^* = \frac{b_1^2}{2a_1}(1 - e^{-2a_1 T}),$$

и не отличается от возмущаемости системы первого порядка.

#### Структурные характеристики достижимости и возмущаемости

Еще одна группа количественных показателей взаимосвязи множества  $U$  входных воздействий на систему и множества  $X$  ее состояний для линейной системы (1) может быть сформирована на основе ее структурного анализа. Полное представление о структуре «вход–состояние», с точки зрения количественных мер управляемости и возмущаемости, дает верхняя каноническая блочная форма Хессенберга (БФХ) [4]. Общий вид системы (1) в верхней БФХ

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \vdots \\ \dot{z}_k \\ \dot{e}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & \dots & F_{1k} & F_{1k+1} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & \dots & F_{2k} & F_{2k+1} \\ 0 & F_{32} & F_{33} & \dots & F_{3k} & F_{3k+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & F_{kk} & F_{kk+1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & F_{k+1k} & F_{k+1k+1} \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_k \\ e_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G_1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot u, \\ y = (C_1 \ C_2 \ C_3 \ \dots \ C_k \ C_{k+1}) \times \\ \times (z_1 \ z_2 \ z_3 \ \dots \ z_k \ e_k)^t.$$

где либо  $F_{kk+1}=0$ , либо  $\dim(e_k)=0$ .

Структура БФХ соответствует разделению пространства состояний  $X$  на подпространства отличающихся структурой управления. В частности, можно рассматривать  $X$  как прямую сумму подпространств  $L_0, L_1, L_2, \dots, L_k$ ,

$$L_0 = sp \begin{pmatrix} z_1 \\ 0 \end{pmatrix}, L_2 = sp \begin{pmatrix} z_2 \\ z_1 \end{pmatrix}, \dots, L_k = sp \begin{pmatrix} 0 \\ e_k \end{pmatrix} = N_k.$$

где

$$\dim(L_0) = r_0, \dim(L_1) = r_1, \dots, \dim(L_k) = r_k; \\ r_0 = m, r_0 + r_1 + \dots + r_k = n.$$

Каждое из подпространств  $L_i$  включает элементы, структурно эквивалентные по управлению.

Исходя из представления системы (1) в БФХ по управлению можно ввести индексные показатели, характеризующие структурные достижимость и возмущаемость подпространств либо отдельных состояний. Очевидно, наиболее структурно управляемым является подпространство  $L_0$ , так как на него непосредственно воздействуют управляющие сигналы. Далее в порядке убывания структурной управляемости следуют подпространства  $L_1, L_2, \dots, L_{k-1}$ . Подпространство  $L_k$  неуправляемо. Примем, что для подпространства  $L_0$  индексный показатель  $\rho_0$  отношений «вход–состояние» равен 1, для  $L_1 - \rho_1 = 2$  и так далее до  $\rho_{k-1} = k$  для  $L_{k-1}$ .

Рассмотрим задачу перевода системы (1) из начала координат в некоторое состояние  $x_0$ . Как показано выше, смысл этой задачи соответствует понятию «достижимость», но в структурном анализе понятия «достижимость» и «управляемость» эквивалентны. Пусть  $x_0 = x_{\rho_0} \oplus x_{\rho_0+1} \oplus \dots \oplus x_{\rho_p}$ , где  $x_{\rho_i} \in L_i$  и  $\rho_h < \rho_{h+1} < \dots < \rho_p$ , т. е.  $x_0$  может быть представлен как прямая сумма элементов подпространств  $L_i$ . Учитывая физический смысл решаемой задачи, дадим следующее определение индекса структурной управляемости.

Индексом структурной управляемости  $\alpha_\lambda(x_0)$  состояния  $x_0$  будем считать  $\rho_p$  как максимальный индекс элементов, входящих в прямую сумму  $x_0 = x_{\rho_0} \oplus x_{\rho_0+1} \oplus \dots \oplus x_{\rho_p}$ . Если  $\rho_p = k$ , то индекс управляемости состояния  $x_0$  совпадает с хорошо известным индексом управляемости системы, который в данном случае равен  $k$ . Состояние  $x_0$  тем лучше управляется, чем меньше его структурный индекс  $\rho_p$ .

Иная структурная оценка отношения «вход–состояние» для того же  $x_0$  и того же самого входа будет получена, если рассматривать его с точки зрения возмущаемости. Наименее структурно возмущаемым подпространством в  $X$  является  $L_k$ , и далее возмущаемость возрастает по мере уменьшения индекса подпространства  $\rho$ . Введем, по аналогии с индексом управляемости, понятие индекса возмущаемости по  $x_0$ .

Индексом структурной возмущаемости  $\alpha_\lambda^*(x_0)$  состояния  $x_0$  будем считать  $\rho_h$  как максимальный индекс элементов, входящих в прямую сумму  $x_0 = x_{\rho_0} \oplus x_{\rho_0+1} \oplus \dots \oplus x_{\rho_p}$ . Состояние  $x_0$  тем лучше возмущается, чем меньше его структурный индекс  $\rho_h$ .

В литературе известны структурные характеристики, имеющие подобный физический смысл. В частности, в [5] определены индексы каузальности как структурные характеристики «вход–вы-

ход» многомерной системы. Легко заметить, что при  $x_0=y_i$  смысл индексов каузальности совпадает с введенным выше структурным показателем возмущаемости состояния  $x_0$ .

#### Выводы

Предложенное разделение количественных и структурных мер «вход–состояние» на показате-

ли, имеющие смысл достижимости, и показатели, имеющие смысл возмущаемости, более полно соответствует их роли в процессах управления. Различия между двумя типами показателей становятся особенно заметными при малых интервалах  $T$ , когда основную роль начинают играть структурные характеристики – индексы управляемости и возмущаемости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muller P.C., Weber H.I. Analysis and optimization of certain qualities of controllability and observability for linear dynamical systems // *Automatica*. – 1972. – V. 8. – № 3. – P. 237–246.
2. Rhodes I.B. Some quantitative measures of controllability and observability and their implications // *Contr. Int. Fed. Autom. Contr.* – Kyoto, Japan, 24–28, August 1981. – P. 24–28.
3. Кириллов О.Е., Лисиенко В.Г. Количественный анализ управляемости и его применение к приближенной декомпозиции

линейных динамических систем // *Автоматика и телемеханика*. – 1997. – № 1. – С. 47–56.

4. Van Dooren P. The generalized eigenstructure problem in linear systems theory // *IEEE Trans. on Autom. Control*. – 1981. – V. AC-26. – № 1. – P. 111–129.
5. Малышенко А.М. Определение индексов каузальности управляемых динамических систем // *Изв. АН СССР. Техническая кибернетика*. – 1990. – № 1. – С. 32–36.

Поступила 29.04.2013 г.

UDC 681.5.011

## QUALIMETRY OF REACHABILITY AND RESPONSE OF LINEAR DYNAMIC SYSTEMS

A.V. Voronin

Tomsk Polytechnic University

*The paper considers some existing numerical estimations of controllability and reachability; their disadvantages are stated from the point of view of application of these estimations to solve the control system synthesis tasks. The existing indices do not take into account the compromise character of requirements to the control systems which include not only a good control response attack but weak dynamic response as well. To estimate these features it is necessary to use different quantitative and structural indices which reflect the interaction of external effects and system reactions. The author has proposed to form on the basis of gramians of controllability and reachability two types of «input–state» quantitative indices from the terminal control tasks and the tasks of synthesizing weak-perturbable systems. The similar approach may be implemented as well on the basis of structural characteristic application.*

#### Key words:

*Quantitative analysis, controllability, linear dynamic systems, Hessenberg representation, controllability measures, structural indices.*

#### REFERENCES

1. Muller P.C., Weber H.I. Analysis and optimization of certain qualities of controllability and observability for linear dynamical systems. *Automatica*, 1972, vol. 8, no. 3, pp. 237–246.
2. Rhodes I.B. Some quantitative measures of controllability and observability and their implications. *Contr. Int. Fed. Autom. Contr.* Kyoto, Japan, 1981, pp. 24–28.
3. Kirillov O.E., Lisenko V.G. Kolichestvenny analiz upravlyaemosti i ego primeneniye k priblizhennoy dekompozitsii lineynykh dinamicheskikh system [The quantitative analysis of controllability

ty and its application to approximate decomposition of linear dynamic systems]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1997, no. 1, pp. 47–56.

4. Van Dooren P. The generalized eigenstructure problem in linear systems theory. *IEEE Trans. on Autom. Control*, 1981, vol. AC-26, no. 1, pp. 111–129.
5. Malyshenko A.M. Opredeleniye indeksov kauzalnosti upravlyаемых динамических систем [Definition of causality indices of operated dynamic systems]. *Bulletin of the AS of the USSR. Technical cybernetics – Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika*, 1990, no. 1, pp. 32–36.

# Интеллектуальные системы

УДК 656.1:658.012.011.56

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВЛЕНИЯ МАРШРУТОВ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА ПРИ СОЗДАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Е.А. Кочегурова, Ю.А. Мартынова

Томский политехнический университет  
E-mail: martynova.ya@gmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации маршрутных схем городского пассажирского транспорта в условиях динамичного социально-экономического развития городов. Рассмотрена система городского пассажирского транспорта, представляющая собой совокупность взаимовлияющих подсистем: «город», «транспорт», «пассажиры». Определены показатели эффективности функционирования городского пассажирского транспорта для всех участников системы. В общем виде приведены целевые функции задачи оптимизации системы городского пассажирского транспорта. Описана задача маршрутизации транспорта, приведена ее классическая формулировка и известные разновидности этой задачи. Рассмотрены известные методы решения транспортных задач: эвристические (классические) и метаэвристические методы. Определен критерий оптимизации маршрутных схем городского пассажирского транспорта, учитывающий взаимодействие интересов всех участников системы. В качестве такого критерия оптимизации для системы городского пассажирского транспорта предложена плотность пассажиропотока на исследуемом участке дороги. Определена формулировка задачи оптимизации системы городского пассажирского транспорта.

### Ключевые слова:

Система городского пассажирского транспорта, показатели эффективности, задача коммивояжера, задача маршрутизации транспорта, оптимизация.

Пассажирский транспорт относится к числу важнейших отраслей жизнеобеспечения города, от функционирования которых зависят качество жизни населения, эффективность работы отраслей экономики города и возможность использования ее градостроительного и социально-экономического потенциала.

За последние годы во многих городах России значительно изменилась структура спроса на пассажирские перевозки. Это обусловлено процессом динамичного социально-экономического развития городов, который вызвал появление новых объектов и зон притяжения пассажиропотоков, таких как деловые, торговые, развлекательные и спортивные центры, изменения в структуре расселения жителей города в связи с появлением новых зон активной жилой застройки.

Одновременно с ростом уровня автомобилизации населения возросла нагрузка на дороги, одну из существенных частей которой составляет пассажирский транспорт.

Все это предопределяет необходимость оптимизации стихийно сложившейся системы городского пассажирского транспорта (ГПТ), не отвечающей

потребностям сегодняшнего дня. Эффективным решением данной проблемы является применение систем поддержки принятия решений в области маршрутизации транспорта [1]. Однако автоматизация задач данной отрасли требует проведения научных исследований с целью получения эффективных алгоритмов, пригодных для использования на практике.

Согласно [2. С. 6–11], в упрощенном виде система ГПТ представляется в виде трех взаимовлияющих подсистем: «город», «транспорт», «пассажиры» (рис. 1).



Рис. 1. Система городского пассажирского транспорта

Подсистема «город» включает в себя такие элементы, как «промышленность», «жилая застройка», «улично-дорожная сеть», а также обслуживание и управление этими элементами. Основным требованием подсистемы «город» к работе ГПТ яв-

ляется обеспечение бесперебойной перевозки городского населения.

Подсистема «транспорт» включает организационные, обеспечивающие пассажирские перевозки.

Для подсистемы «пассажиры» эффективность функционирования транспортной системы определяется качеством удовлетворения спроса на перевозку.

Таким образом, видно, что интересы участников системы ГПТ значительно отличаются друг от друга. В советское время транспортная система подчинялась административному управлению, поэтому оптимизация ГПТ осуществлялась посредством государственного регулирования. Определялись нормативы по некоторым показателям, и ставилась задача сокращения транспортных расходов [3]. В последнее время на рынке ГПТ появились частные перевозчики. Поэтому задача оптимизации ГПТ в условиях конкуренции усложнилась.

Взаимодействия участников ГПТ весьма многообразны и в самом общем виде приведены на рис. 2. Вопросы взаимодействия подсистем «администрация» и «пассажиры» здесь не рассматриваются.

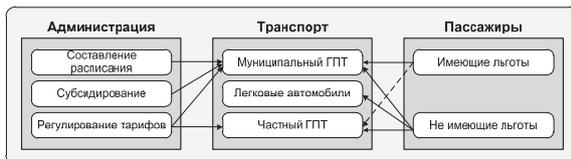


Рис. 2. Схема взаимодействия участников ГПТ

Функционирование системы ГПТ непосредственно связано с его эффективностью. Для ГПТ эффективность полностью определяется потребностями его участников, которые должны быть учтены еще на этапе анализа [4].

С точки зрения городской администрации, показателями эффективности могут быть:

- удовлетворение спроса населения на перевозки;
- экономическая эффективность муниципальных транспортных организаций (максимизация их прибыли);
- эффективность организации дорожного движения;
- отсутствие столкновений интересов муниципальных и частных транспортных операторов, выливающих в конфликты.

С точки зрения транспортных организаций, в качестве основного показателя эффективности выступает максимизация экономической прибыли от перевозок.

С точки зрения пассажиров, конечных потребителей транспортных услуг, показателями эффективности могут быть:

- минимизация времени перемещения;
- минимизация стоимости поездки (с учетом возможных пересадок);
- улучшение комфортабельности поездки (за счет типа транспортного средства и уровня его наполнения).

Определение единого критерия эффективности для пассажиров существенно затруднено различной мотивацией при принятии решения о перемещении и его способе, т. е. понятие оптимальности конкретного пассажира значительно отличается от критерия оптимальности населения в целом.

В качестве интегральных показателей эффективности системы ГПТ для населения могут быть определены следующие критерии:

- минимальное суммарное время ожидания всех пассажиров, которые с некоторой вероятностью направляются от исходных пунктов отправления в пункт назначения;
- минимальное время в пути от любого исходного пункта отправления в любой пункт назначения;
- минимальное количество пересадок при перемещении от любого исходного пункта отправления в необходимый пункт назначения и т. п.

Очевидно, что показатели эффективности с точки зрения участников системы ГПТ являются противоречивыми. Так, например, сокращение времени ожидания пассажиров очевидным образом связано с увеличением количества подвижного состава на маршруте, а следовательно, со снижением его загруженности и экономической выгоды. С другой стороны, стремление увеличить прибыльность транспортными организациями может привести к отказу населения от перевозок и появлению конкурирующих организаций. Таким образом, оценка показателей эффективности должна проводиться с учетом потребностей всех участников системы ГПТ.

На сегодняшний день известно большое количество работ, посвященных оптимизации маршрутов ГПТ. В работах [5–9] авторы предлагают в качестве критерия оптимизации маршрутных схем ГПТ использовать общее время, затраченное пассажирами на поездку, работы [10–12] направлены на сокращение количества пересадок и уменьшение непрямолинейности маршрута. Авторы более поздних работ [13–15] стремятся учитывать затраты транспортных организаций на перевозки и стоимость оценки потерь времени пассажиров на перемещение. Анализ всех этих работ доказывает, что построение оптимальной маршрутной схемы ГПТ необходимо осуществлять с учетом интересов нескольких участников транспортной системы (например, транспортных организаций и пассажиров).

Переходя к формальному описанию задачи оптимизации системы ГПТ, можно выделить несколько основных критериев эффективности, в общем виде представленных в виде целевых функций:

$$\begin{cases} T_{\Pi} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \rightarrow \min; \\ C_{\Pi} = \sum_{Q_{\Pi}} Q_{\Pi} \cdot T \rightarrow \min; \\ \Pi_{\Gamma O} = Q_{\Pi} \cdot T - Z_3 \rightarrow \max, \end{cases}$$

где  $T_{\Pi}$  – время, затраченное пассажирами на передвижение;  $T_1$  – время, затраченное на подход к остановочному пункту;  $T_2$  – время ожидания транспортного средства;  $T_3$  – время поездки;  $T_4$  – время, затраченное на передвижение до места назначения;  $Q_{\Pi}$  – количество пассажиров;  $C_{\Pi}$  – стоимость поездки с учетом возможных пересадок;  $Q_{\Pi\Pi}$  – количество поездок/пересадок в день;  $T$  – тариф на перевозку пассажиров;  $\Pi_{\text{То}}$  – прибыль транспортных организаций;  $Z_3$  – эксплуатационные затраты транспортных организаций.

Формальное описание системы ГПТ применяется в системах поддержки принятия решений в области транспортной маршрутизации: проектирование маршрутной сети населенного пункта, определение типа и количества подвижного состава на маршрутах, оптимизация существующих маршрутных схем и т. д. При этом вопросы оптимизации должны быть рассмотрены с позиций всех участников системы пассажирских перевозок. Их интересы зачастую противоречивы (рис. 3), но оптимизация системы ГПТ должна учесть и сбалансировать потребности всех участников ГПТ.

Одной из основных задач таких систем является создание автоматизированных приложений для расчета и построения эффективных маршрутов городского транспорта, особенно в условиях постоянной модернизации ГПТ. Классическая формулировка этой задачи широко известна как задача транспортной маршрутизации.

В общем виде задача транспортной маршрутизации (Vehicle Routing Problems, VRP) представляет собой задачу комбинаторной оптимизации, в которой для определенного набора транспортных средств, расположенных в одном или разных частях населенного пункта, должен быть определен набор маршрутов до нескольких отдаленных пунктов прибытия. Эта задача является задачей целочисленного программирования, относящейся к классу NP-трудных задач. Алгоритмы комбинаторной оптимизации применяются при решении

NP-трудных задач, позволяя сокращать количество допустимых решений с помощью эффективной процедуры поиска.

Задача маршрутизации транспорта является развитием хорошо изученной задачи коммивояжера (Traveling Salesman Problem, TSP). Задача коммивояжера заключается в нахождении самого оптимального маршрута, который проходит через все указанные города хотя бы по одному разу с последующим возвращением в исходный город. В условиях задачи задаются критерий оптимальности маршрута (кратчайший, дешёвый и т. п.) и соответствующие матрицы расстояний, стоимости и т. п.

Несмотря на то, что эти задачи являются родственными, они отличаются и терминологически, и математическим описанием. Термин «коммивояжер» (travelling salesman) заменен в задаче маршрутизации на «транспортное средство» (vehicle), «город» (town) – на «клиент» (customer), «путь» (tour) – на «маршрут» (route). Кроме того, в задаче маршрутизации транспорта добавлен еще один дополнительный термин – «депо» (depot). Под депо в данной задаче подразумеваются узлы, где начинаются и заканчиваются маршруты всех транспортных средств.

Классическая формулировка задачи транспортной маршрутизации выглядит следующим образом [16]:

1. Задается  $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  – множество всех вершин, где  $v_0$  – вершина, в которой маршрут должен начинаться и заканчиваться («вершина-депо»).
2.  $V^*=V\setminus\{v_0\}$  – множество из  $n$  вершин, необходимых для посещения.
3. Задается  $C$ -матрица стоимостей перемещения между вершинами;  $c_{ij}$  – стоимость проезда между вершинами  $v_i$  и  $v_j$ .
4. Необходимо построить  $m$  маршрутов минимальной суммарной стоимости, начинающиеся и заканчивающиеся в депо  $v_0$ , при этом каждая

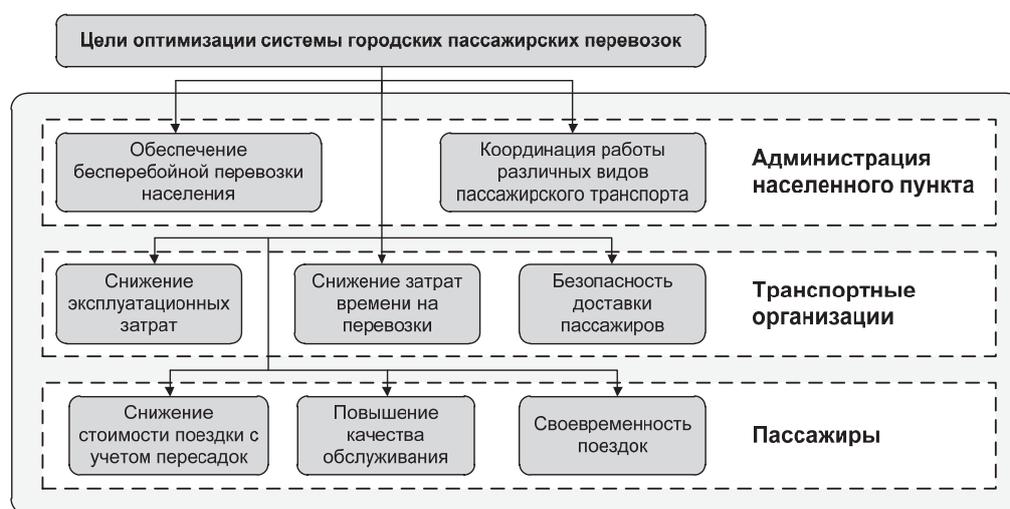


Рис. 3. Цели оптимизации системы ГПТ

вершина  $V^*$  должна быть включена в маршрут только одного транспортного средства.

Классический вариант задачи маршрутизации транспортных средств не всегда охватывает все особенности практических задач построения маршрутов, специфика и формулировка которых приведена в табл. 1.

**Таблица 1.** Разновидности задачи маршрутизации транспорта

Задача	Формулировка
Задача маршрутизации транспорта с учетом грузоподъемности транспортного средства	Задается величина $q > 0$ – грузоподъемность каждого транспортного средства, и множество $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , где $q_i$ определяет объем груза в каждой вершине $v_i$
Задача маршрутизации транспорта с ограничением количества узлов в маршрутах	Задается величина $d > 0$ – максимальное количество вершин, необходимых для посещения, в каждом маршруте
Задача маршрутизации транспорта для нескольких депо	Маршрут может начинаться в любом из возможных депо, но заканчиваться обязательно в том, где начался. Определяется множество $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ вершин-депо
Задача маршрутизации транспорта с разделенной доставкой	Допускается посещение узлов маршрута не одним, а несколькими транспортными средствами
Стохастическая задача маршрутизации транспорта	Некоторые параметры задачи (количество и запросы клиентов и т. д.) могут иметь случайный характер, заданный вероятностными величинами
Задача маршрутизации транспорта с обратным грузом	Транспортные средства должны не только доставлять груз к клиентам, но и обратно
Задача маршрутизации транспорта с окнами времени	Для каждой вершины маршрута определяется некоторый интервал времени для принятия транспортного средства

В настоящее время известно достаточно много методов решения задачи маршрутизации транспорта. Как говорилось ранее, задача маршрутизации транспорта является обобщением известной задачи коммивояжера, в которой необходимо построить сразу несколько замкнутых маршрутов, проходящих через некоторую общую вершину (депо). Эти задачи относятся к классу задач комбинаторной оптимизации и являются NP-трудными. Методов нахождения их точных решений и проверки приближенных на оптимальность за конечное время не существует. Существует точный алгоритм для решения задачи маршрутизации транспорта на основе метода ветвей и границ, но в силу быстрого роста времени вычислений его невозможно применять для задач с более чем 25–30 вершинами.

В последнее время наибольший интерес проявляется к приближенным алгоритмам (табл. 2). В начале 60-х гг. XX в. активное развитие получили эвристические методы, в наши дни называемые классическими. В последние двадцать лет основные усилия были направлены на развитие так называемых метаэвристических методов. Эти методы не

являются законченными эвристиками, готовыми для практического применения, они представляют собой некоторый метод для построения законченной эвристики для конкретной задачи. Большинство этих методов основаны на наблюдениях за живой и неживой природой. Их отличительная особенность заключается в способности преодоления точки локального оптимума для продолжения поиска, поэтому потенциально в сравнении с классическими эвристиками метаэвристические методы способны находить более качественные решения.

**Таблица 2.** Приближенные методы решения задачи маршрутизации транспорта

Тип метода	Классификация методов	Используемые алгоритмы
Эвристические (классические) методы	Конструктивные методы	<ul style="list-style-type: none"> <li>Алгоритм Кларка-Райта (Clarke and Wright);</li> <li>Последовательный алгоритм вставки Моля-Джеймсона (Mole and Jameson);</li> <li>Последовательный алгоритм вставки Кристофидеса-Мингоzzi-Тосса (Christofides, Mingozi and Toth)</li> </ul>
	Двухфазные методы	<ul style="list-style-type: none"> <li>Алгоритм заметания (sweep algorithm);</li> <li>Алгоритм Фишера-Джекумера (Fisher and Jaikumar);</li> <li>Алгоритм Брамела-Симчи-Леви (Bramel-Simchi-Levi);</li> <li>Алгоритм лепестков</li> </ul>
	Улучшающие методы	<ul style="list-style-type: none"> <li>Оптимизация отдельных маршрутов;</li> <li>Улучшение нескольких маршрутов</li> </ul>
Метаэвристические методы	Поиск с исключениями (Taboo search)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Алгоритм Османа (Osman);</li> <li>Алгоритм Генро-Герца-Лапорте (Taburoute);</li> <li>Алгоритм Тейлорда (Taillard);</li> <li>Алгоритм Ксю-Келли (Xu and Kelly);</li> <li>Алгоритм Риго-Рокарола (Rigo and Roucairol)</li> </ul>
	Моделируемый отжиг (Simulated Annealing)	–
	Детерминированный отжиг (Deterministic Annealing)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Пороговое принятие (Threshold accepting);</li> <li>Ход от рекорда к рекорду (Record to record travel)</li> </ul>
	Генетический алгоритм (Genetic algorithm)	–
	Алгоритм на основе муравьиных колоний (Ant Systems)	–
	Нейронные сети (Neural Network)	–

Рассмотренные подходы обычно ориентируются на классическую формулировку задачи маршрутизации транспорта, в которой рассматривается симметричная матрица расстояний, количество транспортных средств жестко не определено, и в

качестве ограничений принята только грузоподъемность транспортного средства или максимальная длина маршрута.

Однако специфика оптимизации маршрутных схем ГПТ вносит ряд дополнительных ограничений в классическую постановку задачи, наряду с основными ограничениями задачи необходимо учитывать:

- 1) наличие нескольких депо;
- 2) ограничение, при котором начало и конец маршрута не должны находиться в одном депо (т. е. не все маршруты должны быть кольцевыми);
- 3) ограничение количества вершин в маршруте (ограничение маршрута по времени и максимальной длине).

Также необходимо обратить внимание на то, что при решении задач дискретной оптимизации, как правило, рассматривается лишь одна целевая функция с дополнительным набором ограничений. Данный подход не позволяет учесть взаимное влияние участников системы, что может привести на практике к выработке неэффективных решений. Поэтому необходимо определить критерий, который будет учитывать взаимовлияние интересов участников системы.

В качестве такого критерия оптимизации для системы ГПТ можно предложить плотность пассажиропотока на исследуемом участке дороги  $A-B$  [17]:

$$D_{AB} = \frac{Q_{AB}^{sum}}{L_{AB}} \rightarrow \max,$$

$$\begin{cases} M = \{m_1, \dots, m_n\}, n > 1; & (1) \\ m_A \neq m_B; & (2) \\ L_{\min} \leq L_{AB} \leq L_{\max}; & (3) \\ Q_{AB}^{sum} > Q_{\min}; & (4) \end{cases}$$

где  $D_{AB}$  – плотность пассажиропотока на участке  $A-B$ ;  $A$  – пункт отправления;  $B$  – пункт назначения;  $Q_{AB}^{sum}$  – общее количество пассажиров, которым необходимо добраться из пункта  $A$  в пункт  $B$ ;  $L_{AB}$  – длина исследуемого пути  $A-B$ ;  $M$  – множество вершин депо; – вершина-депо, в которой начинается и заканчивается маршрут  $A-B$ ;  $L_{\min}/L_{\max}$  – минимально и максимально допустимая длина маршрута;

та;  $Q_{\min}$  – минимальное количество пассажиров на маршруте.

В данной постановке задачи, с учетом того, что количество пассажиров  $Q_{AB}^{sum}$  является статистической величиной, оптимизировать плотность пассажиропотока возможно, только изменяя длину маршрута. Ограничения (1) и (2) на длину маршрута никак не влияют, они определяют только его топологию. Ограничение (4) регулирует количество пассажиров на маршруте. Соответственно, для максимизации данного показателя необходимо уменьшать длину маршрута (в соответствии с ограничением (3)), что позволит учесть интересы как пассажиров (сокращение времени поездки), так и транспортных организаций (увеличение прибыли, за счет более быстрой оборачиваемости подвижного состава). Таким образом, приведенный показатель позволяет учесть интересы сразу нескольких участников системы ГПТ.

### Выводы

При анализе оптимизации маршрутных схем ГПТ были рассмотрены интересы всех участников системы городского транспорта и сформулированы показатели эффективности системы в целом.

Рассмотрена классическая задача маршрутизации транспорта, ее разновидности и методы решения. На основе анализа задач маршрутизации транспорта определены дополнительные ограничения, которые необходимо учитывать при оптимизации маршрутных схем ГПТ. В качестве критерия оптимизации для системы ГПТ предложено использовать плотность пассажиропотока на определенном участке дороги.

Анализ методов решения задач транспортной маршрутизации показал, что наиболее перспективными на сегодняшний день являются метаэвристические алгоритмы. Разрабатываемый алгоритм, дающий решение задачи транспортной маршрутизации с учетом ограничения количества вершин в одном маршруте, а также для нескольких депо и несовпадения начального и конечного депо для одного маршрута, ляжет в основу автоматизированной системы поддержки принятия решений для практического расчета эффективных маршрутов ГПТ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горев А.В. Основы теории транспортных систем. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – 214 с.
2. Корягин М.Е. Равновесные модели системы городского пассажирского транспорта в условиях конфликта интересов. – Новосибирск: Наука, 2011. – 140 с.
3. Абрамов С. Как определить количество автобусов для городского маршрута // Автомобильный транспорт. – 1981. – № 5. – С. 17–18.
4. Вогулякова А.Е. Управление движением городского транспорта. 2008. URL: <http://www.beriki.ru/2008/10/18/upravlenie-dvizheniem-gorodskogo-transporta-chast> (дата обращения: 04.04.2013).

5. Болоненков Г.В. Организация скоростных автобусных сообщений в городах. – М.: Транспорт, 1987. – 160 с.
6. Блатнов М.Д. Пассажирские автомобильные перевозки. – М.: Транспорт, 1981. – 222 с.
7. Carrese S., Gori S. An urban bus network design procedure // Applied Optimization. – 2002. – V. 64. – P. 177–196.
8. Pattnaik S.B., Mohan S., Tom V.M. Urban bus transit route network design using genetic algorithm // Journal of Transportation Engineering. – 1998. – V. 124 (4) – P. 368–375.
9. Park S.J. Bus network scheduling with genetic algorithms and simulation. Master's thesis, University of Maryland. 2005. URL: <http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/2496/1/umi-umd-2373.pdf> (дата обращения: 01.04.2013).

10. Самойлов Д.С. Городской транспорт. – М.: Стройиздат, 1983. – 384 с.
11. Zhao F., Gan A. Optimization of transit network to minimize transfers. Tech. Rep. Florida, Department of Transportation, Florida international University. 2003. URL: [http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed\\_Proj/Summary\\_PTO/FDOT\\_BD015\\_02rpt.pdf](http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed_Proj/Summary_PTO/FDOT_BD015_02rpt.pdf) (дата обращения: 01.04.2013).
12. Yu B., Yang Z. Optimizing bus transit network with parallel ant colony algorithm // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – Bangkok, 2005. – V. 5. – P. 374–389.
13. Антошвили М.Е., Либерман С.Ю., Спириин И.В. Оптимизация городских автобусных перевозок. – М.: Транспорт, 1985. – 102 с.
14. Nallusamy R., Duaiswamy K., Dhanalaksmi R. Optimization of multiple vehicle routing problems using approximation algorithms // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2009. – V. 1 (3). – P. 129–135.
15. Bachelet B., Yon L. Enhancing theoretical optimization solutions by coupling with simulation // Proceeding of the 1<sup>st</sup> OICMS, Clermont-Ferrand. – France, 2005. – P. 331–342.
16. Christofides N. The vehicle routing problem // European Journal of Operational Research. – 1992. – V. 59. – P. 345–358.
17. Zhongzhen Ya., Bin Yu, Chuntian Ch. Parallel ant colony algorithm for bus network optimization // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2007. – V. 22. – P. 44–55.

Поступила 05.04.2013 г.

UDC 656.1:658.012.011.56

## OPTIMIZATION OF PLANNING THE PUBLIC TRANSPORT ROUTES WHEN DEVELOPING THE AUTOMATED DECISION SUPPORT SYSTEMS

E.A. Kochegurova, Yu.A. Martynova

Tomsk Polytechnic University

*The relevance of the work is determined by the need of urban transport route optimization under dynamic socio-economic development of cities. The authors have considered the urban passenger transport system which is a set of interdependent subsystems: «town», «transport», «passengers». The indicators of efficient functioning of urban passenger transport are determined for all participants in the system. The objectives of the optimization problem of urban passenger transport are given in general terms. The authors have described transport routing problem, have introduced its classic statement and known aspects of this problem. The paper introduces the known methods for solving transport problems: heuristics (classic) and metaheuristic methods. The criteria for optimization of route schemes of urban passenger transport which considers the mutual interests of all participants in the system are determined. The density of traffic flow in the target section of the road has been proposed as such optimization criterion for urban passenger transport system. The authors have determined the statement of optimization problem of urban passenger transport.*

### Key words:

*Urban passenger transport system, efficiency indices, traveling salesman problem, vehicle routing problem, optimization.*

### REFERENCES

1. Gorev A.V. *Osnovy teorii transportnykh sistem* [Fundamentals of the theory of transport systems]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2010. 214 p.
2. Koryagin M.E. *Ravnovesnye modeli sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta v usloviyakh konflikta interesov* [Equilibrium model of urban passenger transport in terms of conflict of interest]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2011. 140 p.
3. Abramov S. Kak opredelit kolichestvo avtobusov dlya gorodskogo marshruta [How to determine the number of buses for city routes]. *Avtomobilnyi transport*, 1981, no. 5, pp. 17–18.
4. Vogulyakov A.E. *Upravlenie dvizheniem gorodskogo transporta* [Traffic control of urban transport]. 2008. Available at: <http://www.beriki.ru/2008/10/18/upravlenie-dvizheniem-gorodskogo-transporta-chast> (accessed 4 April 2013).
5. Bolonenkov G.V. *Organizatsiya skorostnykh avtobusnykh soobshcheniy v gorodakh* [Organization of bus rapid transit in cities]. Moscow, Transport Publ., 1987. 160 p.
6. Blatanov M.D. *Passazhirskie avtomobilnye perevozki* [Passenger transport by road]. Moscow, Transport Publ., 1981. 222 p.
7. Carrese S., Gori S. An urban bus network design procedure. *Applied Optimization*, 2002, vol. 64, pp. 177–196.
8. Pattnaik S.B., Mohan S., Tom V.M. Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 1998, vol. 124 (4), pp. 368–375.
9. Park S.J. *Bus network scheduling with genetic algorithms and simulation*. Master's thesis, University of Maryland. 2005. URL: <http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/2496/1/umi-umd-2373.pdf> (accessed 1 April 2013)
10. Samoylov D.S. *Gorodskoy transport* [City transport]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 384 p.
11. Zhao F., Gan A. *Optimization of transit network to minimize transfers*. Tech. Rep. Florida, Department of Transportation, Florida international University. 2003. URL: [http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed\\_Proj/Summary\\_PTO/FDOT\\_BD015\\_02rpt.pdf](http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed_Proj/Summary_PTO/FDOT_BD015_02rpt.pdf) (accessed 1 April 2013)
12. Yu B., Yang Z. Optimizing bus transit network with parallel ant colony algorithm. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. Bangkok, 2005, vol. 5, pp. 374–389.
13. Antoshvili M.E., Liberman S.Yu., Spirin I.V. *Optimizatsiya gorodskikh avtobusnykh perevozok* [Optimization of urban bus transport]. Moscow, Transport Publ., 1985. 102 p.
14. Nallusamy R., Duaiswamy K., Dhanalaksmi R. Optimization of multiple vehicle routing problems using approximation algorithms. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2009, vol. 1 (3), pp. 129–135.
15. Bachelet B., Yon L. Enhancing theoretical optimization solutions by coupling with simulation. *Proceeding of the 1<sup>st</sup> OICMS*, Clermont-Ferrand, France, 2005, pp. 331–342.
16. Christofides N. The vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 1992, vol. 59, pp. 345–358.
17. Zhongzhen Ya., Bin Yu, Chuntian Ch. Parallel ant colony algorithm for bus network optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2007, vol. 22, pp. 44–55.

УДК 621.313.13:519.677

## ВЫЯВЛЕНИЕ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ ОБМОТКИ РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ РАССЕЙНИЯ

В.И. Полищук, А.А. Хамухин

Томский политехнический университет

E-mail: polischkvi@tpu.ru

**Актуальность работы** обусловлена отсутствием апробированных методов функциональной диагностики виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора, а возникновение такого повреждения у крупных генераторов приводит к большому экономическому ущербу.

**Цель работы:** поиск диагностического признака возникновения виткового замыкания на основе вейвлет-анализа ЭДС на выходе датчика магнитного поля, установленного в торцевой зоне генератора.

**Методы исследования:** на основе непрерывного вейвлет-преобразования произведен анализ экспериментальных данных для получения масштабного-временного спектра, который позволяет выявлять локальные неоднородности анализируемого сигнала.

**Результаты:** Реализован алгоритм в виде компьютерной программы. Алгоритм протестирован по трем входным сигналам от датчика магнитного рассеяния, установленного в торцевой зоне синхронного генератора. Выявлен признак наличия витковых замыканий на основе использования отклонения спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования сигнала с датчика магнитного потока рассеяния. Представлены результаты обработки экспериментальных данных на основе предложенного алгоритма, позволяющие выявлять витковые замыкания обмотки ротора.

### Ключевые слова:

Ротор синхронного генератора, магнитный поток рассеяния, витковые замыкания ротора, интегральный вейвлет-спектр, дисперсия вейвлет-коэффициентов.

### Введение

Синхронный генератор (СГ) представляет собой сложную электромеханическую систему, а возникновение такого повреждения как витковое замыкание (ВЗ) в обмотке ротора у крупных СГ приводит к большому экономическому ущербу. В то же время вывить такое замыкание крайне сложно. Защиты от ВЗ в роторе пока еще не разработаны, а диагностируется такое повреждение в подавляющем большинстве случаев только во время капитального ремонта на полностью разобранный машине. Это связано с тем, что в месте ВЗ отсутствует ток короткого замыкания в классическом его понимании. Нет электрической дуги и значительного изменения падения напряжения. Вследствие синхронной скорости вращения ротора ток в замкнутом витке возникает в виде кратковременных импульсов во время качаний ротора либо в переходных режимах работы. Крайне важно на основе информации со штатных измерительных средств выбрать диагностические параметры, значения которых однозначно связаны с техническим состоянием межвитковой изоляции.

Одним из путей решения задачи по построению функциональной диагностики ВЗ обмотки ротора СГ является разработка методов анализа симметрии магнитного поля в торцевой зоне машины на основе датчиков магнитного поля [1, 2]. Однако спектральный анализ, используемый в [1, 2], показал недостаточную чувствительность к данному виду повреждения. Цель работы – исследовать возможность использования непрерывного вейвлет-преобразования при поиске диагностического признака возникновения виткового замыкания в обмотке ротора СГ на основе анализа ЭДС с выхода датчика магнитного поля, установленного в торцевой зоне генератора.

**Постановка задачи:** на основе экспериментальных данных, полученных с датчика магнитного поля рассеяния, необходимо выявить диагностический признак ВЗ в обмотке ротора СГ с применением интегрального вейвлет-спектра и дисперсии вейвлет-коэффициентов.

### Экспериментальная установка

Состав экспериментальной установки представлен на рис. 1. Установка состоит из генератора ГАБ-4-Т/230 – 1, приводимого во вращение асинхронным двигателем – 2, питаемым преобразователем частоты (Altivar 71) – 3. В СГ на подшипниковом щите установлен индукционный датчик, сигнал с которого через коннектор ввода (СВ-68LP) – 4 и плату ввода/вывода (NI PCI 6024E, 12 разрядов, максимальная частота дискретизации 20 МГц) подается в промышленный компьютер – 5 с монитором – 6. Для создания замыкания с обмотки ротора выведены через дополнительные контактные кольца отпайки – 3 (4, 10 и 20 % витков полюса). Генератор нагружался асинхронным двигателем, на валу которого установлена машина постоянного тока для создания тормозного момента.

### Метод исследования

Для анализа магнитных потоков рассеяния необходимо получить частотно-временной спектр сигнала с датчика магнитного потока, установленного в торцевой зоне СГ, и выделить из него величину искажения вносимого витковым замыканием. В настоящее время эффективным инструментом получения частотно-временного спектра сигнала является непрерывное вейвлет-преобразование (НВП). Непрерывное вейвлет-преобразование используется для получения масштабного-временного спектра, который позволяет выявлять локальные неоднородности анализируемого сигнала [3].

Среди различных модификаций вейвлет-преобразования (дискретное, диадное, пакетное ВП и т. д.) непрерывное ВП является самым вычислительно ёмким. Однако для анализа сигналов применяют именно НВП, поскольку оно предоставляет больше информации, чем другие методы вейвлет-преобразования. Так, известно применение НВП для обнаружения шумов подводных лодок противника [4], для выявления предпомпажного состояния (срыва) авиационных двигателей [5], для определения работоспособности породоразрушающего инструмента при бурении скважин [6], для распознавания речи в сильно зашумлённом сигнале [7] и др.

При цифровой обработке сигналов реализация непрерывного вейвлет-преобразования в строгом виде невозможна, поэтому следует рассматривать дискретизированное непрерывное вейвлет-преобразование.

Алгоритм может быть реализован параллельно и итерационно. Его основная отличительная особенность заключается в разделении процесса вейвлет-преобразования на 2 этапа: подготовительный и основной [8–12].

На подготовительном выбирают: шаг оцифровки анализируемых данных  $\Delta t$ , количество и значения масштабов по времени ( $J$  и  $a_j$ ), вид функции  $\Psi$  (материнский вейвлет), ограничение на максимальное количество отсчетов анализируемого сигнала ( $n$ ). На этом же этапе по формуле (1) вычисляют и сохраняют базисные коэффициенты  $P_{i,j,k}$ , которые потребуются для реализации второго этапа вычисления НВП:

$$P_{i,j,k} = \left\{ \frac{\Delta t}{\sqrt{a_j}} \Psi \left[ \frac{(i-k)\Delta t}{a_j} \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $\Psi \left[ \frac{(i-k)\Delta t}{a_j} \right]$  – некоторая функция с опреде-

ленными свойствами, полученная из материнского вейвлета;  $i, j, k$  – индексы по времени  $t$ , по масштабу  $a$ , по сдвигу по времени  $b$ .

На втором (основном) этапе по формулам (2) и (3) вычисляют текущие значения НВП для момента времени  $(i\Delta t)$ .

$$W^0(a_j, b_k) = 0, \quad (2)$$

$$W^{i+1}(a_j, b_k) = W^i(a_j, b_k) + S(i\Delta t) \cdot P_{i,j,k}, \quad (3)$$

где  $S(i\Delta t)$  – оцифрованный с равномерным шагом анализируемый сигнал  $S(t)$ .

При поступлении следующего отсчета анализируемых данных в момент времени  $(i+1)\Delta t$  к уже рассчитанному массиву значений НВП добавляют только один слой значений, рассчитываемых по формуле (3). При этом используют подготовленный на первом этапе массив коэффициентов  $P_{i,j,k}$ . Таким образом, реализуется итерационный процесс уточнения НВП, что позволяет уменьшить количество вычислений и сократить время расчета.

В [12] показано, что алгоритм вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования, представленный выражениями (1–3), сходится к известному непрерывному вейвлет-преобразованию анализируемого сигнала  $S(t)$ :

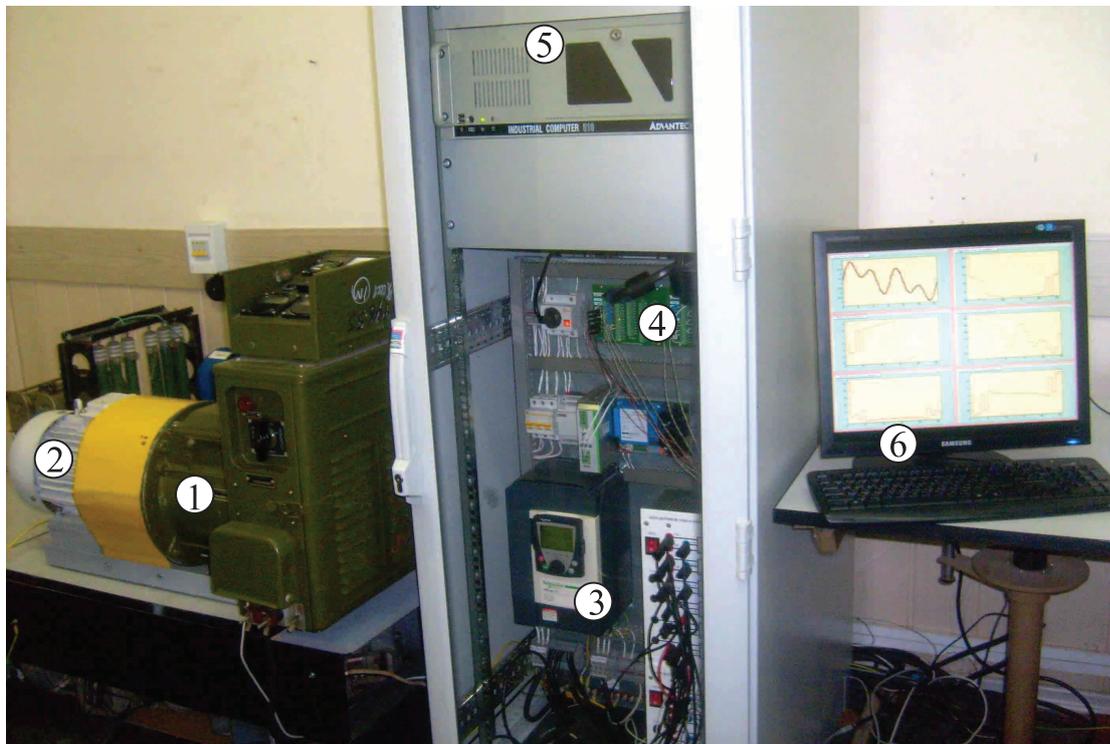


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – синхронный генератор; 2 – асинхронный двигатель; 3 – преобразователь частоты; 4 – коннектор ввода; 5 – промышленный компьютер; 6 – монитор

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \cdot \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Для более удобного и надежного обнаружения локальных неоднородностей анализируемого сигнала кроме непрерывного вейвлет преобразования может понадобиться вычисление некоторых функций от НВП.

Алгоритм выявления витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе анализа локальных неоднородностей магнитных потоков рассеяния может быть представлен в следующем виде.

1. Измерение анализируемого сигнала  $S(t)$  (рассеяния магнитного потока на торце синхронного генератора) и передача его в аналогово-цифровой преобразователь.

2. Аналогово-цифровое преобразование и получение дискретизированного сигнала  $S(i\Delta t)$  с шагом дискретизации  $\Delta t$ , который должен удовлетворять требованию теоремы Котельникова-Найквиста:

$$f_d = \frac{1}{\Delta t} \geq 2f_{\max},$$

где  $f_d$  – частота дискретизации входного сигнала,  $f_{\max}$  – максимальная частота, которой ограничен спектр полезной составляющей входного сигнала.

3. Непрерывное вейвлет-преобразование оцифрованного входного сигнала  $\hat{S}(i\Delta t)$  и получение значений НВП  $W(a_j, b_k)$ , состоящее из двух этапов: подготовительного и основного. Подготовительный этап можно выполнить только один

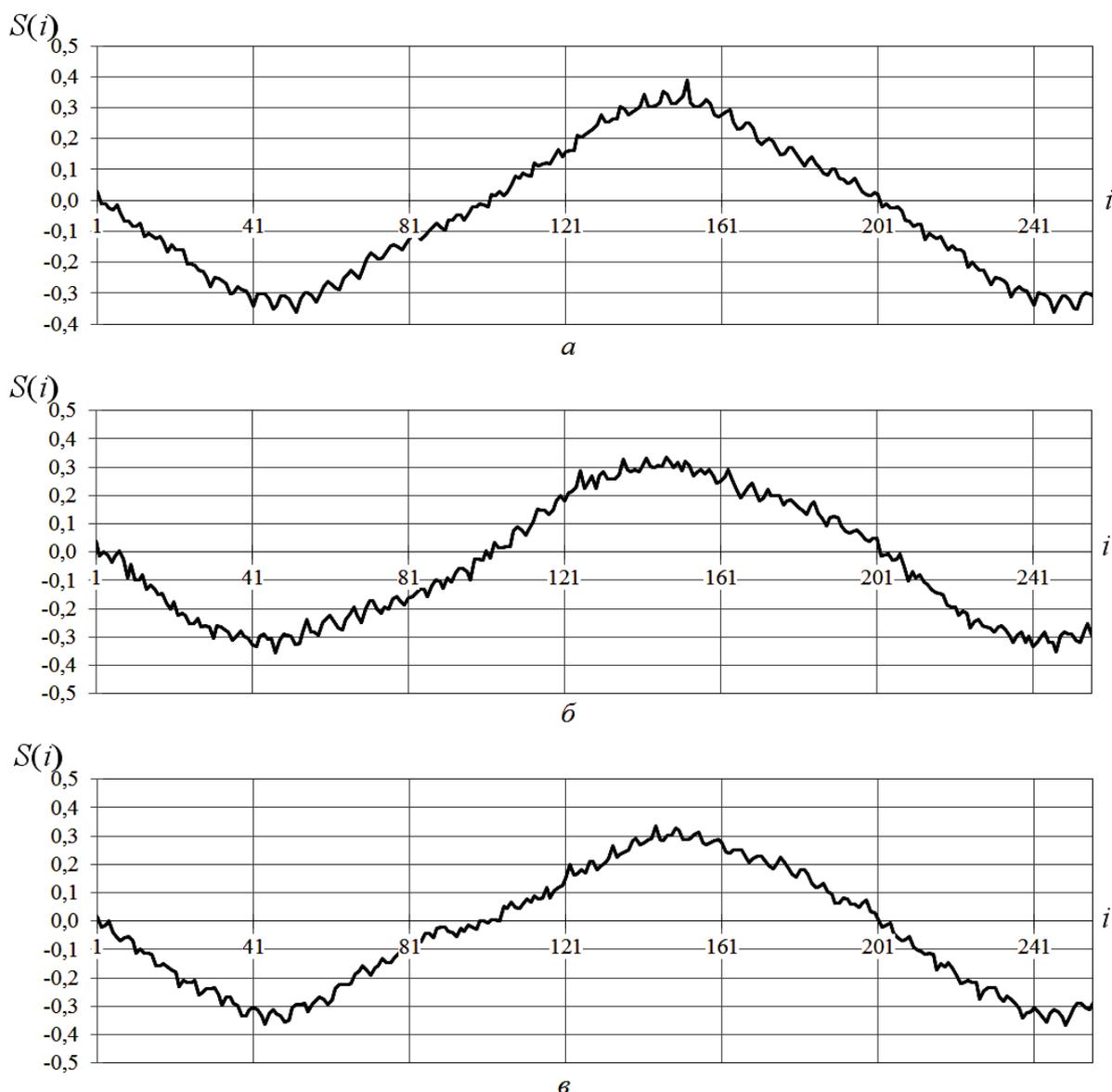


Рис. 2. Анализируемый сигнал: а) генератор на холостом ходу без повреждений; с короткозамкнутыми витками обмотки; б) 4; в) 20 %

раз для одного исследуемого генератора, а затем периодически повторять только второй этап, который требует существенно меньше вычислений.

4. Вычисление интегрального вейвлет-спектра (ИВС) по полученному НВП:

$$\bar{W}(a_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [W(a_j, b_k)]^2 \equiv W(j).$$

5. Определение по ИВС правильности выбора масштабов  $a_j$  либо их коррекция и возврат на п. 3.  
 6. Вычисление распределения дисперсии вейвлет-коэффициентов по анализируемому промежутку времени:

$$\bar{W}(b_k) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \left[ W(a_j, b_k) - \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J W(a_j, b_k) \right] \equiv W(k).$$

7. Выявление по распределению дисперсии вейвлет-коэффициентов неоднородных участков и анализ вейвлет-коэффициентов по всем масштабам на отклонение от синусоиды.

**Результаты исследования**

Алгоритм, описанный выше, был реализован в виде компьютерной программы. Для тестирования алгоритма были выбраны три входных сигнала от датчика магнитного рассеяния, установленного в торцевой зоне синхронного генератора: без повреждений обмотки, с 4 % короткозамкнутых витков и 20 % короткозамкнутых витков. Было выбрано количество отсчетов входного сигнала, подлежащего анализу,  $N=256$  (на разных участках измерения по времени), количество масштабов  $M=16$ , шаг  $\Delta t=0,0001$  с. Опыты были проведены с нагруженным синхронным генератором и на холостом ходу.

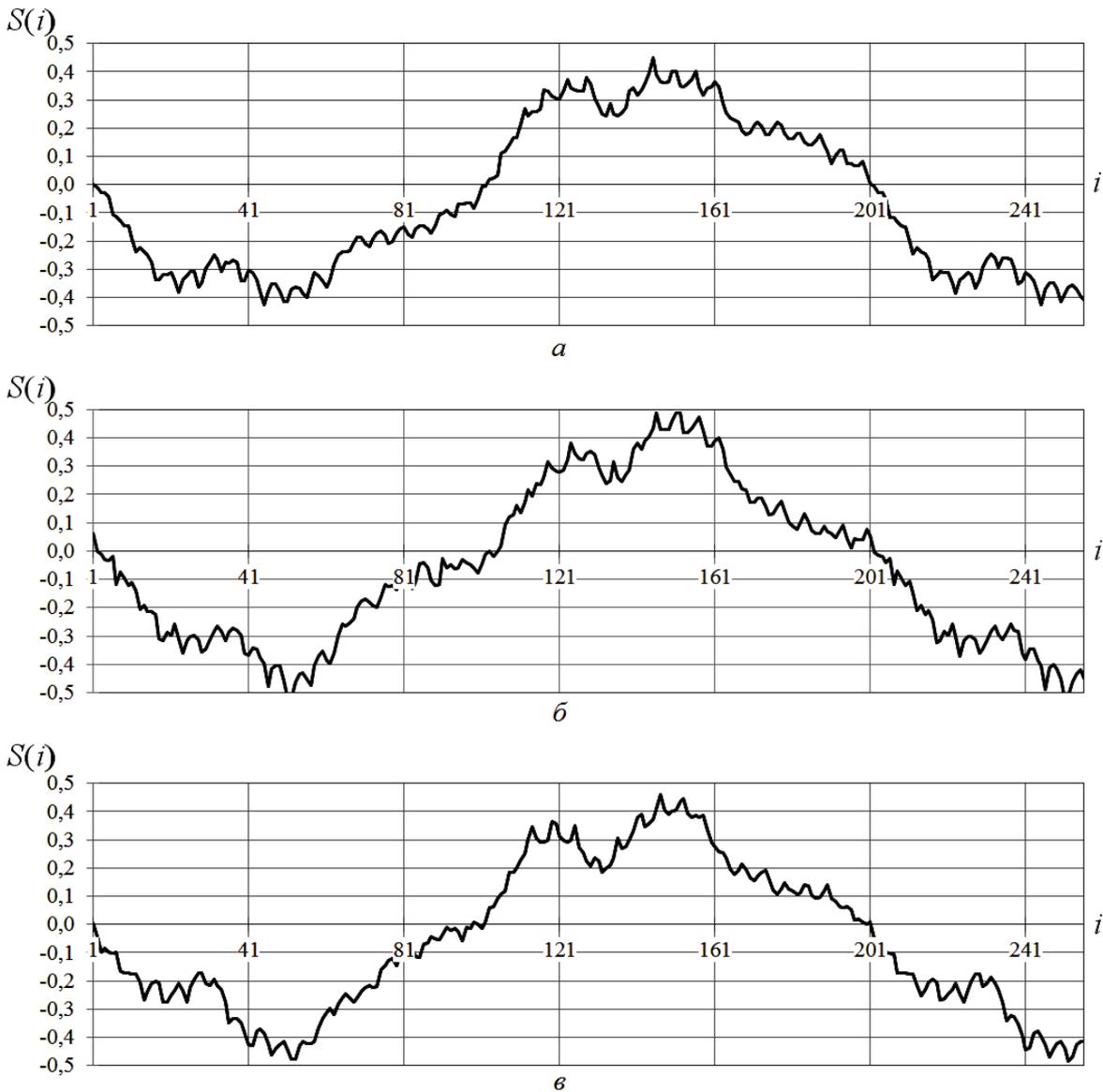


Рис. 3. Анализируемый сигнал: а) нагруженный генератор без повреждений; с короткозамкнутыми витками обмотки; б) 4; в) 20 %

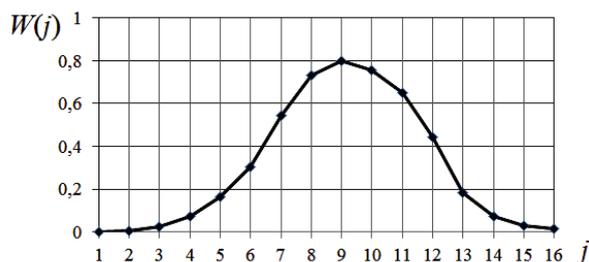


Рис. 4. Расчетный интегральный вейвлет-спектр анализируемых сигналов для генератора на холостом ходу без повреждений

В качестве материнского вейвлета использовалась функция, известная под названием «мексиканская шляпа» (МНАТ), которая является второй производной функции Гаусса и описывается уравнением:

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \left[ e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \cdot \left( 1 - \frac{x^2}{\sigma^2} \right) \right],$$

где  $x=(t-b)/a$ ;  $\sigma$  – параметр, позволяющий изменять масштаб вейвлета в соответствии с видом входного сигнала. Этот вейвлет имеет узкий энергетический спектр, а нулевой и первый моменты этого вейвлета равны 0.

Вид анализируемых входных сигналов представлен на рис. 2 (холостой ход) и рис. 3 (нагруженные синхронные генераторы).

Вид расчетного интегрального вейвлет-спектра для анализируемых сигналов показан на рис. 4 (для генератора на холостом ходу). Для нагруженного генератора и для генераторов с короткозамкнутыми витками обмотки 4 и 20 % ИВС выглядят аналогично.

По форме интегрального вейвлет-спектра, представленного на рис. 4, можно сделать вывод, что масштабы выбраны правильно и их коррекция не требуется. Распределение ИВС по масштабам имеет четко выраженный максимум на 9-м масштабе, соответствующий основной гармонике анализируемого сигнала. Также видно, что масштабы 1, 2 и 15, 16 почти не дают вклада в ИВС и дальнейшее уменьшение или увеличение масштабов не даст дополнительной информации.

Расчетные распределения дисперсии вейвлет-коэффициентов представлены на рис. 5.

Из рисунка видно, что нагруженный генератор даже без витковых замыканий уже имеет асимметричное распределение дисперсии вейвлет-коэффициентов. Поэтому отклонение от симметрии за счет витковых замыканий следует выявлять для генератора на холостом ходу. Масштаб 9 соответствует основной гармонике основного сигнала и отклонения от синусоиды не имеет. Масштабы 8 и 7 близки к основному. Заметные отклонения от синусоиды обнаружены для вейвлет-коэффициентов 6-го масштаба (рис. 6).

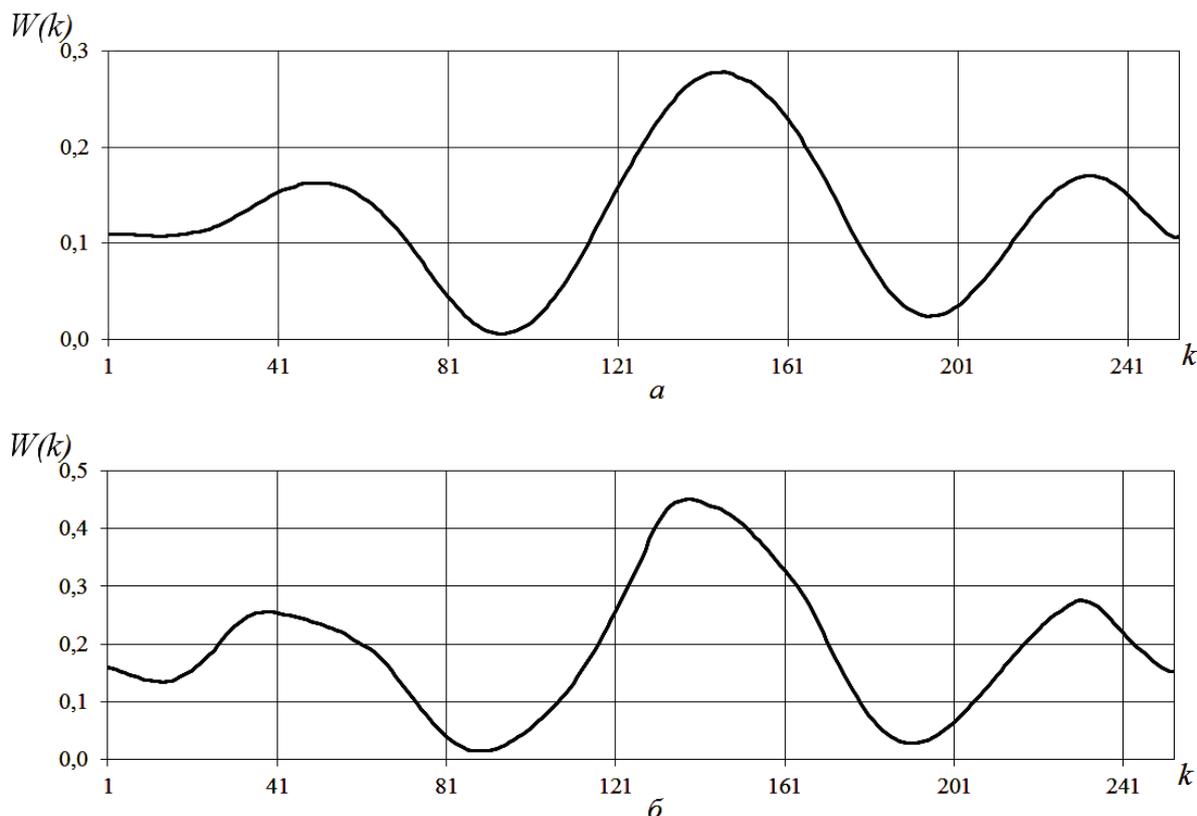
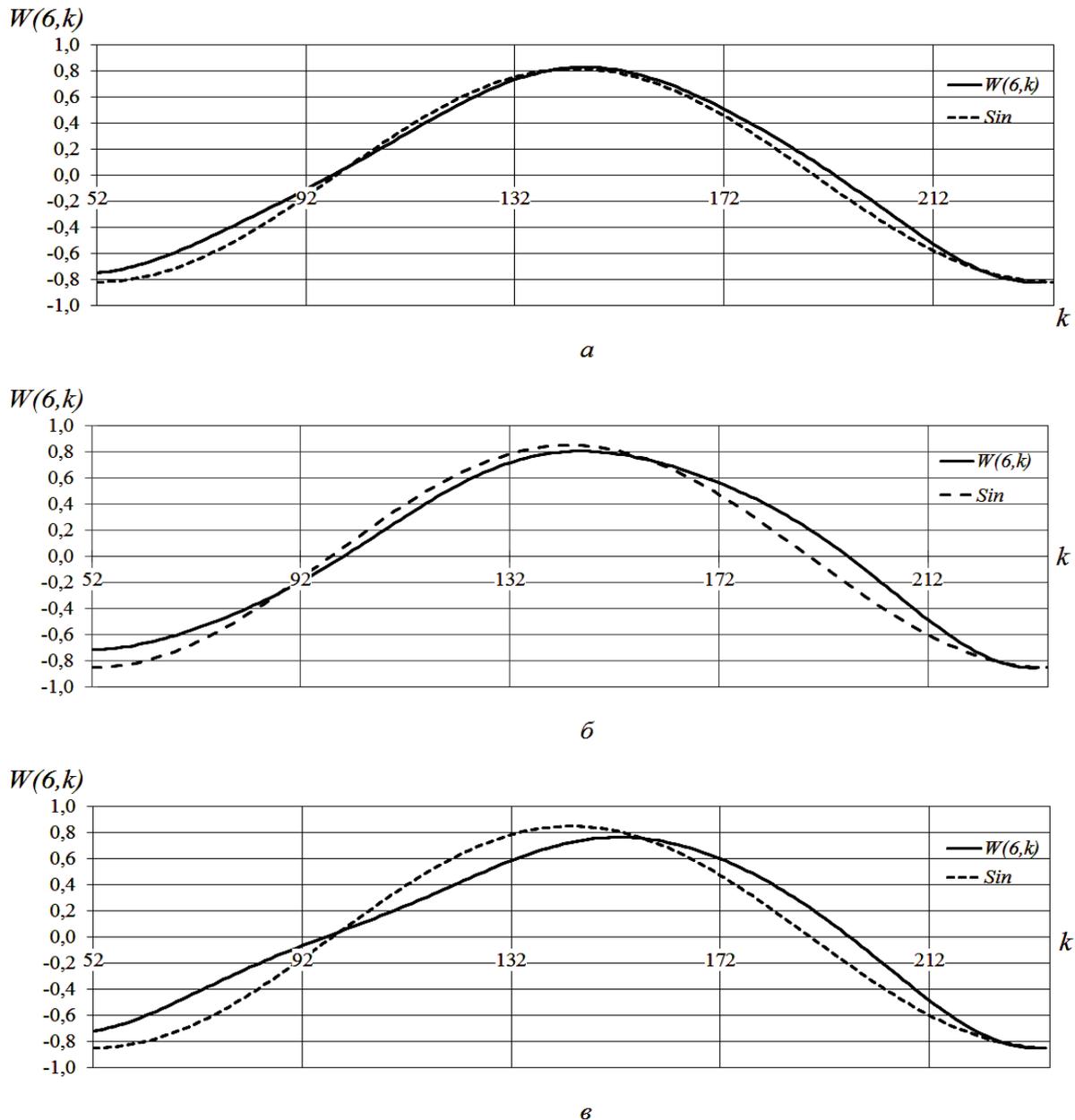


Рис. 5. Распределение дисперсии вейвлет-коэффициентов: а) генератор на холостом ходу без повреждений; б) нагруженный генератор без повреждений



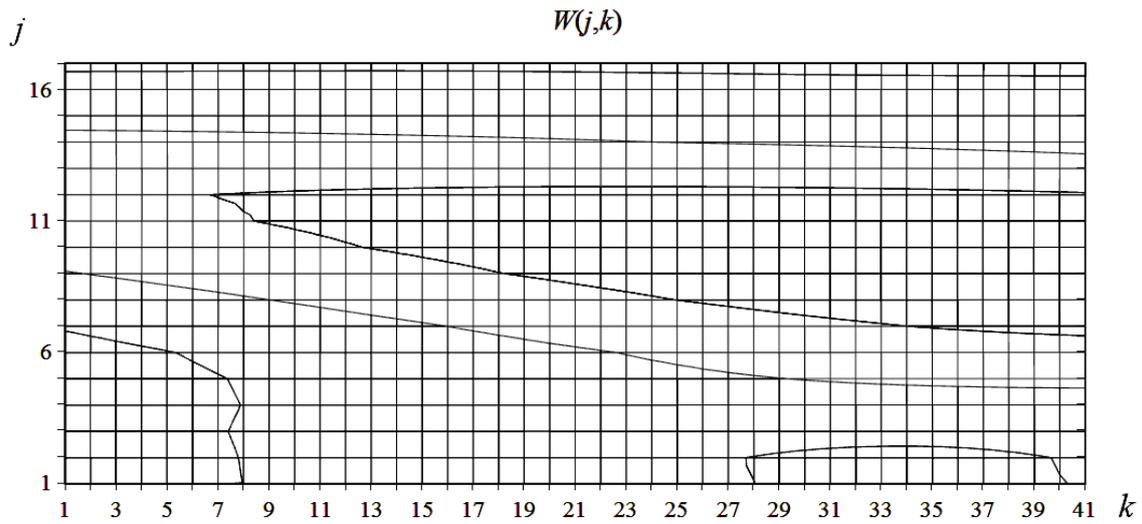
**Рис. 6.** Отклонение вейвлет-коэффициентов 6-го масштаба от синусоиды: а) генератор на холостом ходу без повреждений; б) с замыканием 4 % витков обмотки ротора; в) с замыканием 20 % витков обмотки ротора

В количественном выражении относительная сумма модулей отклонения вейвлет-коэффициентов 6-го масштаба от синусоиды составила 11, 16 и 25 % соответственно для генераторов: без повреждений, с 4 и 20 % короткозамкнутых витков. По этим данным вполне реально выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на холостом ходу на основе предложенного алгоритма.

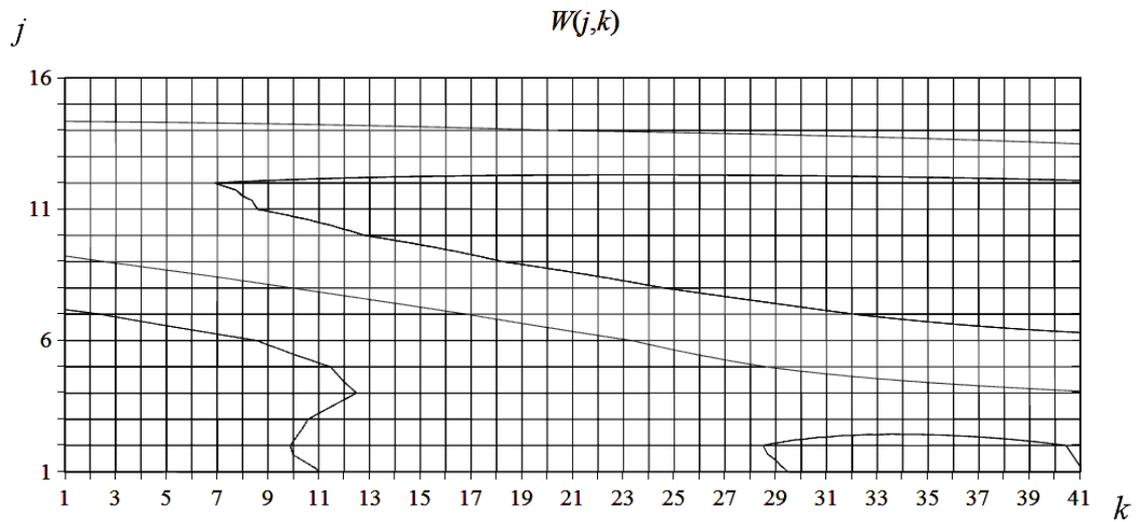
На нагруженном генераторе такую закономерность обнаружить не удалось, поскольку влияние магнитного поля статора искажает симметричность магнитного поля ротора. Однако для нагруженного генератора были выявлены другие закономерности изменения вейвлет-коэффициентов

при появлении витковых замыканий ротора. Эти закономерности нашли свое отражение в спектрограммах НВП, некоторые из которых представлены на рис. 7.

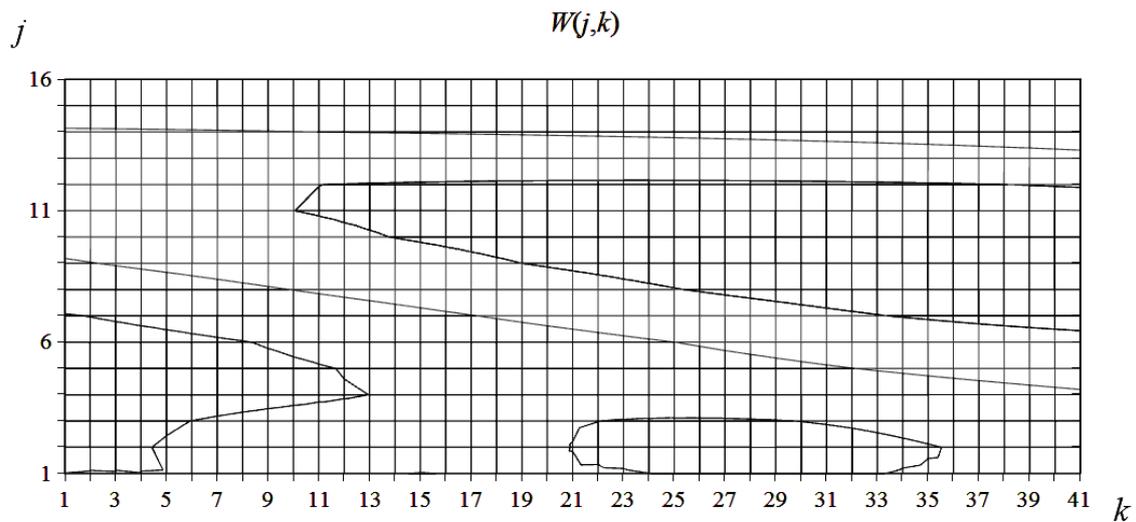
Спектрограмма изображает линии равного уровня, образованные от поверхности функции  $W(a,b)$ . Левая нижняя четверть спектрограмм нагруженного генератора без повреждений явно отличается от этой же части спектрограмм для нагруженного генератора с короткозамкнутыми витками обмотки. Это отличие также может быть использовано для выявления витковых замыканий обмотки ротора нагруженного синхронного генератора на основе предложенного алгоритма.



а



б



в

**Рис. 7.** Спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования анализируемого сигнала: а) нагруженный генератор без повреждений; б) с замыканием 4 % витков обмотки ротора; в) с замыканием 20 % витков обмотки ротора

### Выводы

1. Разработан алгоритм применения непрерывного вейвлет-преобразования сигнала с датчика магнитного поля, расположенного в торцевой зоне синхронного генератора, с целью обнаружения витковых замыканий ротора.
2. Выявлен признак наличия витковых замыканий на основе использования отклонения спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования сигнала с датчика магнитного потока рас-

сеяния от первоначальной, полученной для генератора без повреждений.

3. Установлено, что дополнительно для синхронного генератора на холостом ходу следует в качестве признака наличия витковых замыканий использовать отклонение от синусоиды вейвлет-коэффициентов масштабов, близких к масштабу основной гармоник.

*Работа выполнена в рамках исполнения Госзадания «Наука» ГК № 7.2826.2011.*

### 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; опубл. 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. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. – Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2003. – 104 с.
4. Устройство обнаружения узкополосных шумовых гидроакустических сигналов на основе вычисления интегрального вейвлет-спектра: пат. 2367970 РФ, МПК G 01 S 3/80 (2006.01). № 2007145474/28; заявл. 28.11.2007; опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26. – 27 с.
5. Способ диагностики работы двигателя: пат. 2154813 РФ, МПК G01M15/00. № 99105603/06; заявл. 19.03.1999; опубл. 20.08.2000, Бюл. № 23. – 7 с.
6. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента: пат. 2188939 РФ, МПК E 21 B 44/06, E 21 B 45/00. № 2001113974/03; заявл. 25.05.2001; опубл. 10.09.2002, Бюл. № 25. – 6 с.
7. Xueying Zhang, Zhefeng Zhao, Gaofeng Zhao. A Speech Endpoint Detection Method Based on Wavelet Coefficient Variance and

Sub-Band Amplitude Variance // Innovative Computing, Information and Control, 2006 (ICIC '06): First International Conference. – Beijing, Aug. 30 – Sept. 1 2006. – V. 3. – P. 83–86.

8. Устройство для вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования: пат. 2437147 РФ, МПК G 06 F 17/14. № 2010127068/08; заявл. 01.07.2010; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35. – 9 с.
9. Хамухин А.А. Математическая модель ячейки однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Проблемы информатики. – 2011. – № 5. – С. 87–93.
10. Хамухин А.А. Применение ячеек однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 149–153.
11. Хамухин А.А. О параллельном вычислении непрерывного вейвлет-преобразования в задаче обнаружения узкополосных шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра // Техническая акустика. Электрон. журн. 2012. № 5. URL: <http://ejta.org/ru/khamukhin1> (дата обращения: 20.06.2013).
12. Хамухин А.А. Итерационный алгоритм вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013. – № 3. – С. 9–13.

*Поступила 21.10.2013 г.*

## THE IMPACT OF TURN-TO-TURN SHORT CIRCUITS OF SYNCHRONOUS GENERATOR ROTOR WINDING BASED ON WAVELET ANALYSIS OF LEAKAGE FLUX

V.I. Polishchuk, A.A. Khamukhin

Tomsk Polytechnic University

**The relevance of the work** is conditioned by the lack of proven methods of functional diagnostics of turn-to-turn short circuits in synchronous generator windings, but an occurrence of this damage in high power generators causes large economic losses.

**The main aim of the study** is to determine the diagnostic criterion of turn-to-turn short circuit occurrence based on the wavelet analysis of EMF at a magnetic field sensor output in the area of the generator end plate.

**The methods used in the study:** The analysis of the experimental data meant for obtaining the scale-time spectrum which allows detecting local nonuniformities of an analyzed signal is carried out on the basis of the continuous wavelet transform.

**The results:** The algorithm is finally presented as a computer code. The algorithm is tested for three input signals from the magnetic scattering sensor installed in the generator end plate area. The authors determined the criterion of the turn-to-turn short circuit occurrence by variation value of the continuous wavelet transform spectrogram of the magnetic flux scattering sensor signal. The paper introduces the results of experimental data analysis on the basis of the proposed algorithm which indicates the event of a turn-to-turn short circuit.

### Key words:

Synchronous generator rotor, magnetic leakage flux, coiled rotor circuit, integral wavelet spectrum, wavelet coefficients variance.

### REFERENCES

1. *Ustroystvo zashchity sinkhronnoy elektricheskoy mashiny ot vitkovykh i dvoynnykh na zemlyu zamykaniy v obmotke rotora* [The security device of synchronous electric machine from interturn and double earth fault in the winding rotor stalemate]. Patent KZ 22450. no. 2008/1073.1, 2008.
2. Polishchuk V.I. Postroenie zashchity ot vitkovogo zamykaniya v obmotke rotora sinkhronnogo generatora na osnove induktsionnogo datchika magnitnogo polya rasseyaniya [Construction of protection interturn fault in the winding of synchronous generator rotor based on inductive sensor magnetic stray field]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 57–61.
3. Yakovlev A.N. *Vvedenie v veyvlet-preobrazovaniya* [Introduction into wavelet transform]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2003. 104 p.
4. Saprykin V.A., Small V., Shatalov G.V. *Ustroystvo obnaruzheniya uzkopolosnykh shumovykh gidroakusticheskikh signalov na osnove vychisleniya integralnogo veyvlet-spektra* [The detection device of narrowband sonar signals based on the evaluation of the integral wavelet spectrum]. Patent RF, no. 2367970, 2009.
5. Dremine I.M., Furlotov V.I., Ivanov O.V., Nechitaylo V.A., Terziyev V.G. *Sposob diagnostiki raboty dvigatelya* [A method of engine operation diagnosing]. Patent RF, no. 2154813, 2000.
6. Yamaliev V.U., Khasanov M.M., Yakulov R.N., Ishemguzhin E.I., Kuzev I.R., Solodovnikov D.S. *Sposob opredeleniya rabotosposobnosti porodorazrushayushchego instrumenta* [Method of assessing the performance of drilling tools]. Patent RF, no. 2188939, 2002.
7. Xueying Zhang, Zhefeng Zhao, Gaofeng Zhao. A Speech Endpoint Detection Method Based on Wavelet Coefficient Variance and Sub-Band Amplitude Variance. *Innovative Computing, Information and Control, 2006 (ICICIC '06): First International Conference*. Beijing, Aug. 30 – Sept. 1 2006, vol. 3, pp. 83–86.
8. Khamukhin A.A. *Ustroystvo dlya vychisleniya diskretizirovannogo nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya* [A device for computing a sampled continuous wavelet transform]. Patent RF, no. 2437147, 2011.
9. Khamukhin A.A. Matematicheskaya model yacheyki odnorodnoy struktury dlya vychisleniya nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya [Mathematical model of a homogeneous cell structure for calculation of the continuous wavelet transform]. *Problems of Informatics*, 2011, no. 5, pp. 87–93.
10. Khamukhin A.A. Primeneniye yacheek odnorodnoy struktury dlya vychisleniya nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya [The use of a uniform cell structure for calculation of the continuous wavelet transform]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 5, pp. 149–153.
11. Khamukhin A.A. O parallelnom vychislenii nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya v zadache obnaruzheniya uzkopolosnykh shumovykh gidroakusticheskikh signalov na osnove integralnogo veyvlet-spektra [On the parallel computation of the continuous wavelet transform to the problem of detecting narrowband sonar signals from the integral wavelet spectrum]. *Electronic Journal. Technical Acoustics*, 2012, no. 5. Available at: <http://ej-ta.org/ru/khamukhin1> (accessed 20.06.2013).
12. Khamukhin A.A. Iteratsionnyy algoritm vychisleniya diskretizirovannogo nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya [An iterative algorithm for computing the sampled continuous wavelet transform]. *Herald of computer and information technologies*, 2013, no. 3, pp. 9–13.

УДК 004.9:622.276

## ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКОЙ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО» МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В.А. Силич, В.П. Комагоров, А.О. Савельев

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

**Актуальность работы** обусловлена отсутствием единой универсальной технологии применения постоянно-действующих геолого-технологических моделей, включающей в себя решение задач непрерывного сбора и передачи геолого-технологической информации, автоматизированной адаптации модели на текущее состояние разработки месторождения и оптимизации планирования и оценки эффективности геолого-технических мероприятий.

**Цель работы:** формирование основополагающих принципов разработки системы мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения на основе постоянно действующей геолого-технологической модели.

**Методы исследования:** объектно-ориентированная методология проектирования, метод последовательного синтеза информационных технологий управления.

**Результаты:** Сформулированы основополагающие принципы организации системы мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения: адаптивности, прозрачности, единого информационного пространства и контроля целостности. Полученные результаты могут быть использованы при построении промышленных систем мониторинга текущего состояния разработки нефтяных месторождений.

### Ключевые слова:

«Интеллектуальное» месторождение, система мониторинга, поддержка принятия решений, проектирование информационных систем.

### Введение

Одним из главных направлений повышения качества проектирования, контроля и управления разработкой месторождений углеводородов является применение цифровых постоянно действующих геолого-технологических моделей месторождений [1–3].

Основным средством поддержки принятия решений, применяемым при разработке месторождений, является постоянно действующая геолого-технологическая модель (ПДГТМ).

ПДГТМ – это объемная имитация месторождения, хранящаяся в памяти компьютера в виде многомерного объекта, позволяющая исследовать и прогнозировать процессы, протекающие при разработке в объеме резервуара, непрерывно уточняющаяся на основе новых данных на протяжении всего периода эксплуатации месторождения.

ПДГТМ обеспечивает возможность эффективного решения следующих задач:

- а) Расчет различных вариантов разработки: определение характера и степени выработки запасов на основе анализа полей распределения насыщенности флюидов и удельных остаточных запасов; выявление условий и особенностей продвижения закачиваемых вод.
- б) Прогноз темпов отбора добывающих скважин.
- в) Оптимизация режимов работы добывающих скважин.
- г) Уточнение геологического строения месторождения (залежи) в процессе бурения новых скважин.
- д) Планирование геолого-технических мероприятий (ГТМ) и расчет экономической эффективности их выполнения.

- е) Прогноз состояния разработки месторождения при целенаправленном изменении условий разработки продуктивных пластов в рамках запланированных ГТМ.

Вместе с тем аналитический обзор современной научно-технической, нормативной и методической литературы свидетельствует о том, что применение цифровых постоянно действующих геолого-технологических моделей месторождений для повышения эффективности разработки месторождений ограничено рядом факторов, к числу которых относятся:

- а) отсутствие технологии оперативного сбора и хранения геолого-технологической информации о текущем состоянии разработки месторождений;
- б) неавтоматизированная адаптация ПДГТМ на текущее состояние разработки месторождения и, как следствие, низкое качество адаптации;
- в) недостаточная эффективность планируемых и выполняемых ГТМ из-за низкого качества адаптации ПДГТМ;
- г) отсутствие возможности составления оперативных прогнозов состояния разработки месторождения после проведения ГТМ.

Актуальной задачей является разработка новых технологий и методов, обеспечивающих возможность непрерывного сбора и хранения геолого-технологической информации, автоматизированной адаптации ПДГТМ, формирования оптимальной стратегии разработки месторождения.

### Особенности «интеллектуального» месторождения

В настоящее время появилась и активно развивается концепция «интеллектуального» место-

рождения [4–6]. При этом отсутствует технология контроля и управления разработкой, учитывающая структурные особенности «интеллектуального» месторождения, включающего в себя «интеллектуальные» кустовые площадки и «интеллектуальное» заканчивание скважин [7].

В рамках настоящей статьи под терминами «интеллектуальное» месторождение, «интеллектуальная» кустовая площадка и «интеллектуальная» скважина будем понимать следующее.

«Интеллектуальное» месторождение – это комплекс оборудования кустов скважин, площадок подготовки и хранения нефти и газа, поддержания пластового давления, промысловых трубопроводов, содержащий средства телеметрии для непрерывного сбора технологической информации и ее передачи по вычислительной сети нефтегазового предприятия в центр управления промыслом (ЦУП) для мониторинга:

- а) технологических процессов и адаптивного управления разработкой месторождения на основе ПДГТМ;
- б) технологических процессов подготовки и перекачки нефти;
- в) технологических процессов поддержания пластового давления;
- г) состояния сетей трубопроводов и составления прогнозов по возникновению аварийных ситуаций.

«Интеллектуальная» кустовая площадка – это комплекс оборудования куста скважин, включающий в себя добывающие и нагнетательные скважины, электроцентробежные (ЭЦН) и штанговые глубинные (ШГН) насосы, станции управления насосами, водораспределительные батареи (ВРБ) нагнетательных скважин и блок местной автоматики (БМА), содержащий микропроцессорный комплекс, который обеспечивает непрерывный сбор, обработку и передачу технологической информации в центр управления разработкой месторождения.

«Интеллектуальная» скважина – это комплекс наземного и подземного оборудования скважины, включающий в себя погружную и наземную телеметрию (датчики, приборы, микропроцессорные контроллеры) для непрерывного сбора и обработки информации о работе системы «пласт – скважина – насосная установка» и обеспечения функционирования этой системы в заданном режиме автоматически либо при изменении режима функционирования (параметров системы) оператором добычи.

#### Принципы организации системы мониторинга и адаптивного управления

Для формирования стратегии разработки системы мониторинга технологических процессов и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения на основе ПДГТМ были сформированы следующие основные принципы.

1. *Принцип адаптивности.* Управление разработкой месторождения на уровне нефтедобывающих компаний является формализованным процессом, этапы которого определяются соответствующими регламентами. Последовательность действий каждого из этапов зависит от организационной структуры компании. Следовательно, проектирование системы мониторинга и адаптивного управления на основе набора типовых регламентов неэффективно по следующим причинам:

- а) Частичное соответствие регламентов различных компаний друг другу. Система, разработанная на основе нормативных документов одной компании, не может быть внедрена в деятельность другой без существенных изменений.
- б) Изменяемость организационной структуры компании и регламентов ее работ. В случае оптимизации рабочих процессов, изменения внешних условий и соответствующих им изменений регламентов работ понадобится модернизация системы.

Для обеспечения возможности полного выполнения проектируемой системой требуемых функций необходимо обеспечить непрерывность процесса мониторинга технологических процессов разработки «интеллектуального» месторождения, адаптации ПДГТМ на текущее состояние разработки, принятия решений при планировании ГТМ и оценке их эффективности.

Формирование функций управления предлагается осуществлять путем комбинирования задач управления и этапов жизненного цикла переработки информации (метод последовательного синтеза информационных технологий). В основе данного метода лежит последовательное формирование множества задач управления, функций переработки информации и сопоставление каждой из функций информационных и программно-технических средств их реализации. Задачи управления формируются путем сопоставления множеств этапов жизненного цикла разработки месторождений и жизненного цикла управления. Некоторые получившиеся комбинации могут быть отброшены как несущественные [8].

Схема формирования функций управления приведена на рис. 1.

Реализация системы мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения в соответствии с указанным принципом обеспечит адаптируемость системы к внешним изменениям, а также независимость общей ее структуры от регламентов и норм отдельных компаний при сохранении высокой степени интеграции системы в рабочие процессы управления.

2. *Принцип прозрачности.* В настоящее время разработаны и применяются различные типы датчиков измерения параметров технологических процессов разработки месторождения.

Формируемые ими данные используются для оперативного управления, оптимизации режимов работы скважин и формирования истории разработки месторождений.

При внедрении новых типов датчиков в технологические процессы добычи нефти изменяются и требования к программному обеспечению сбора, передачи, хранения и предварительной обработки информации. Возникает необходимость в изменении соответствующих компонент системы мониторинга и адаптивного управления. Для минимизации затрат в рамках актуализации подсистем сбора и хранения данных предлагается [9, 10]:

а) Использовать модульный подход при проектировании системы. Структурно система должна представлять совокупность компонент-модулей, формализованное описание которых должно содержать характеристики атрибутов и функций модуля. По возможности границы «ответственности» каждой из компонент (выполняемые компонентой функции) должны охватывать решение уз-

а) Использовать модульный подход при проектировании системы. Структурно система должна представлять совокупность компонент-модулей, формализованное описание которых должно содержать характеристики атрибутов и функций модуля. По возможности границы «ответственности» каждой из компонент (выполняемые компонентой функции) должны охватывать решение уз-

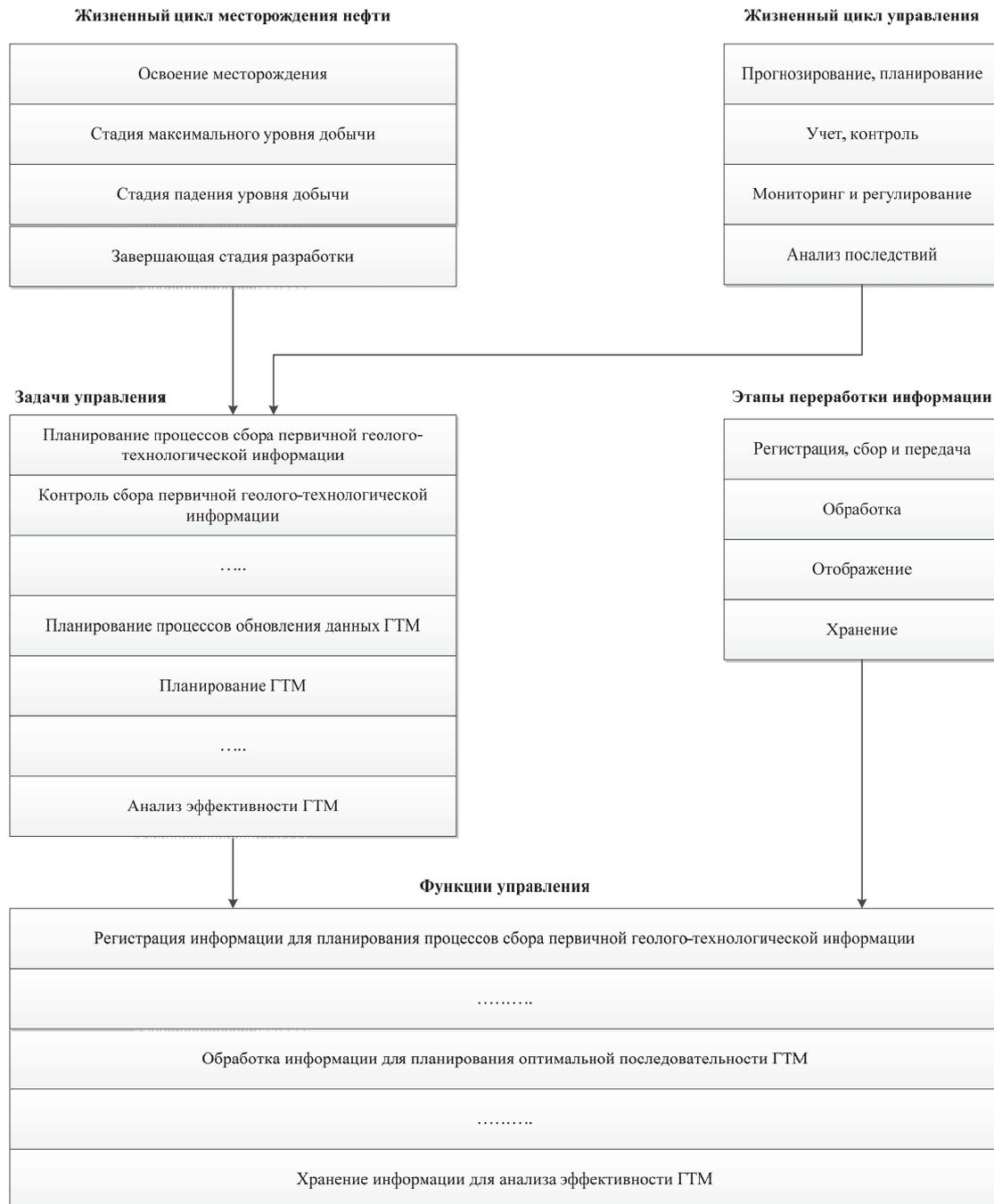


Рис. 1. Схема формирования функций управления системы мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения

кого круга задач для минимизации вносимых изменений.

- б) Для каждой из компонент системы разработать модель, характеризующую зависимость атрибутов. Модель должна содержать перечень атрибутов и характеристику их взаимосвязей в виде соответствующих алгоритмов и правил.

В качестве инструмента реализации указанного принципа предлагается использовать объектно-ориентированную методологию проектирования [11, 12].

3. *Принцип единого информационного пространства.* В большинстве случаев у каждого структурного подразделения, участвующего в процессах мониторинга и управления разработкой месторождения, имеются программные средства, автоматизирующие или обеспечивающие информационное сопровождение решаемых подразделением задач. Информационная целостность процессов управления обеспечивается соблюдением соответствующих регламентов оформления и предоставления данных и документов остальным участникам процесса управления разработкой.

При таком подходе выполнение задач мониторинга и управления осложняется и задерживается из-за низкой оперативности получения актуальной на текущий момент информации. Одним из решений в данном случае является использование концепции единого информационного пространства.

Единое информационное пространство представляет собой совокупность баз и банков данных,

технологий их ведения и использования, информационно-телекоммуникационных систем и сетей, функционирующих на основе единых принципов и по общим правилам [13]. Центральной составляющей единого информационного пространства является хранилище данных (ХД), консолидирующее информацию, необходимую при решении задач управления разработкой месторождения посредством методов и процедур, направленных на извлечение информации из различных источников и обеспечивающих необходимый уровень ее информативности и качества [14].

Предлагается использовать витрины данных – локальные тематические хранилища, подключенные к консолидированному ХД и обслуживающие отдельные группы субъектов процесса управления разработкой месторождения [15]. Такой подход позволит обеспечить совместимость различных информационных компонент системы мониторинга и адаптивного управления, а также подключение новых компонент без изменения общей структуры системы с помощью соответствующего модуля импорта-экспорта.

Схема консолидации информации представлена на рис. 2.

4. *Принцип контроля целостности.* Комплексный подход к проектированию системы мониторинга и адаптивного управления требует наличия средств обеспечения логической целостности всех компонент системы. Фактически необходимо обеспечение:

- целостности данных;
- связи между компонентами и модулями системы.

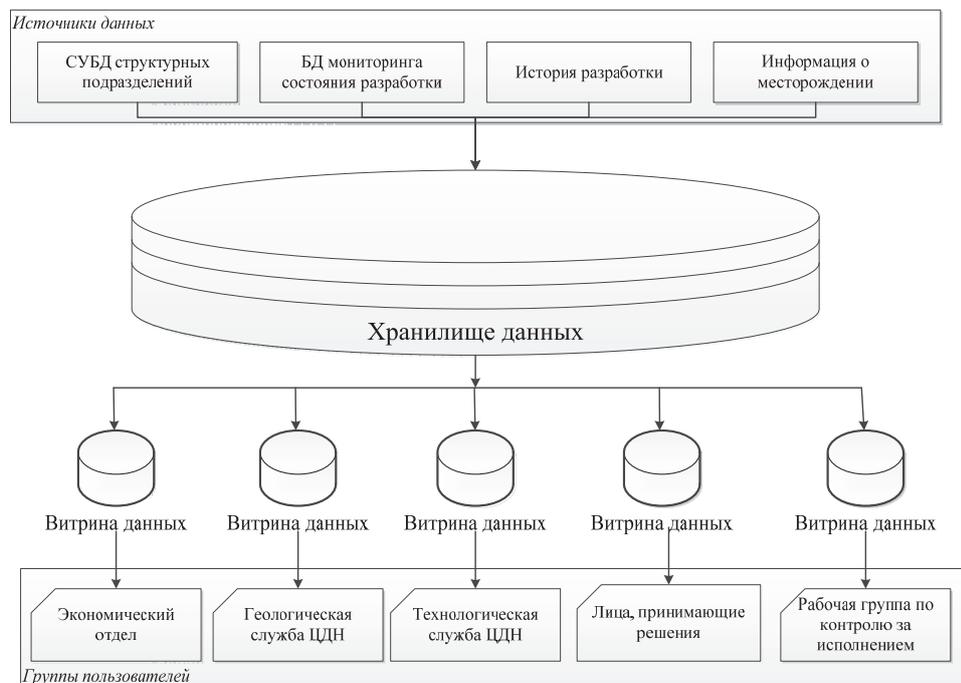


Рис. 2. Схема консолидации данных системы мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения

Единое консолидированное хранилище данных позволяет решить первую задачу. В качестве средства решения второй предлагается использовать подсистему мониторинга сетевой инфраструктуры и информационных систем.

Сетевая инфраструктура нефтедобывающей компании представляет собой межрегиональную мультисервисную интегрированную сеть, обеспечивающую широкий спектр услуг структурным подразделениям компании и ее дочерним предприятиям [16]. Общее количество устройств, подключенных к сетям такого вида, достигает десятков тысяч. При этом для их соединения используются практически все виды каналов передачи данных: от модемных линий и оптоволоконных до спутниковых каналов и радиорелейных линий связи.

Подобная сетевая инфраструктура формируется годами, в результате чего она представлена широкой номенклатурой сетевых устройств, их программного обеспечения и приложений. В связи с этим для обеспечения непрерывного оперативного поступления геолого-технологической информации с месторождений необходимо разработать и внедрить подсистему мониторинга сетевой инфраструктуры и информационных систем, которая должна обладать следующим набором свойств:

- использовать узкоспециализированные средства мониторинга объектов сетевой инфраструктуры в качестве базовых систем сбора информации;
- осуществлять мониторинг всех объектов сетевой инфраструктуры;
- осуществлять мониторинг функций нижних уровней;
- все данные мониторинга должны проходить через единое хранилище данных, консолидирующее представление сетевой инфраструктуры;
- мониторинг должен осуществляться в режиме реального времени (24 часа в сутки, 7 дней в неделю);
- сбор данных о состоянии сетевой инфраструктуры не должен оказывать существенного влияния на работу сети в целом.

Реализация данной подсистемы на основе предложенных принципов позволит, с одной стороны, обеспечить связь между компонентами и модулями системы мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения, с другой стороны – обеспечит контроль за

работой отдельных компонент и их аппаратного обеспечения.

В ходе выполнения работ по созданию системы мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения были решены следующие задачи:

- а) Выбор и обоснование направлений исследований по созданию системы мониторинга технологических процессов и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» месторождения на основе ПДГТМ.
- б) Разработаны принципы построения и общая архитектура системы мониторинга и адаптивного управления, определены ее функции, состав и структура программно-аппаратного комплекса макета системы.

### Заключение

Анализ существующих подходов к разработке месторождений нефти и газа позволил выявить отсутствие единой универсальной технологии применения ПДГТМ, включающей в себя решение задач непрерывного сбора и передачи геолого-технологической информации, автоматизированной адаптации ПДГТМ на текущее состояние разработки месторождения и оптимизации планирования и оценки эффективности ГТМ.

Недостатки применения ПДГТМ могут быть в значительной степени устранены в условиях «интеллектуального» месторождения – комплекса оборудования кустов скважин, содержащего средства телеметрии для непрерывного сбора геолого-технологической информации и ее передачи в ЦУП для принятия эффективных решений при управлении разработкой месторождения.

Результаты проведенных научно-исследовательских работ могут быть использованы при построении промышленных систем мониторинга разработки месторождений. На их основе можно проводить интегрированный мониторинг производственных процессов и управления разработкой месторождений на предприятиях нефтегазового комплекса, обучать студентов и проводить подготовку, переподготовку, тестирование и сертификацию специалистов для нефтегазовых предприятий.

*Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках финансирования работ по государственному контракту 14.515.11.0047.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование разработки нефтяных месторождений с использованием постоянно действующих геолого-технологических моделей / С.А. Жданов, М.М. Максимов, А.Я. Хавкин, Л.П. Рыбickaя, О.Т. Цыбульская, Г.Н. Гогоненков, В.И. Евстифеев, Н.Ф. Величкина, В.А. Юдин // Нефтяное хозяйство. – 1997. – № 3. – С. 43–47.
2. Кац Р.М., Каневская Р.Д. Проектирование разработки нефтяных месторождений с применением гидроразрыва пластов (ГРП) на основе современных компьютерных технологий // Повышение уровня добычи нефти на месторождениях ОАО «Ноябрьскнефтегаз» в 1998–2005 гг.: Матер. научно-техн. конф. – Ноябрьск, 1998. – Москва, ВНИИОЭНГ, 1998. – С. 300–304.
3. Меркурьева Е.А. Анализ эффективности использования постоянно действующих моделей при проектировании разработки нефтяных месторождений и их адаптация к реальным геолого-промышленным условиям: дис.... канд. техн. наук. – Уфа, 2008. – 146 с.
4. Маркелов Д.В. «Месторождение на ладони» – инновационный взгляд на перспективу интеллектуальных месторождений // Инженерная практика. – 2010. – № 9. – С. 43–46.

5. «Интеллектуальное» заканчивание: автоматизированное управление добычей / С. Дайер, Я. Эль-Хазиндар, М. Хубер, И. Ро, Д. Рид // Schlumberger. 2013. URL: [http://www.slb.ru/userfiles/file/Oilfield%20Review/2007/winter/1%20Intelligent Completion.pdf](http://www.slb.ru/userfiles/file/Oilfield%20Review/2007/winter/1%20Intelligent%20Completion.pdf) (дата обращения: 09.02.2013).
6. Кравцов М. «Интеллектуальное» месторождение: новые возможности и новые решения // ОЗНА. 2013. URL: [http://ozna.ru/presscenter/articles/detail.php?SECTION\\_ID=&ELEMENT\\_ID=1414](http://ozna.ru/presscenter/articles/detail.php?SECTION_ID=&ELEMENT_ID=1414) (дата обращения: 09.02.2013).
7. Концепция создания отраслевого программного продукта республики Казахстан для проектирования, разработки и мониторинга геолого-технических мероприятий / Д.В. Булыгин, М.И. Курбанбаев, М.Д. Досмухамбетов, А.А. Энгельс // Дельта Ойл Проект. 2013. URL: <http://do-project.ru/docs/2011-1.pdf>, (дата обращения: 20.06.2013).
8. Силич В.А., Силич М.П. Теория систем и системный анализ. – Томск: Томский политехнический университет, 2010. – 218 с.
9. Основные принципы проектирования ИС // Материалы по информационным технологиям. 2013. URL: <http://infdis.narod.ru/pis/pis-p4-2.htm> (дата обращения: 09.06.2013).
10. Проектирование информационных систем // Univer. 2013. URL: <http://univer-nn.ru/it/proektirovanieAIS.php> (дата обращения: 09.06.2013).
11. Применение технологии 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. Гребенчиков // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 42–46.
12. 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.
13. Понятие единого информационного пространства // Мир Web. 2013. URL: <http://pautina34.ru/?p=192> (дата обращения: 09.06.2013).
14. Консолидация данных – ключевые понятия // Корпоративный менеджмент. 2013. URL: <http://www.cfin.ru/itm/olap/cons.shtml> (дата обращения: 09.06.2013).
15. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 704 с.
16. Управление информацией // Лукойл-Информ. 2013. URL: [http://lukoil-inform.ru/main/content.asp?art\\_id=2964](http://lukoil-inform.ru/main/content.asp?art_id=2964) (дата обращения: 09.06.2013).

Поступила 05.09.2013 г.

UDC 004.9:622.276

## PRINCIPLES OF DEVELOPING THE SYSTEM OF MONITORING AND ADAPTIVE CONTROLLING THE INTELLIGENT OIL FIELD STUDY BASED ON PERMANENT GEOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL MODELS

V.A. Silich, V.P. Komagorov, A.O. Savelyev

Tomsk Polytechnic University

*The article discusses an approach to organization of managing the «intelligent» oil field study. The approach is based on the construction and the automated adaptation of a permanent geological and process model of oil field. The paper describes the principles of monitoring system and adaptive management of the study.*

**The main aim of the study** is to form the fundamental principles of developing the system of monitoring and adaptive management of the «intelligent» field study on the basis of permanent geological and technological model.

**The methods used in the study:** the Object Model for System Design methodology, the method of successive synthesis of information technology management.

**The results:** The following fundamental principles of monitoring and adaptive management of the «intelligent» development field are stated: adaptability, transparency, common information space and integrity. The results can be used when designing the industrial monitoring systems of oil production current state.

### Key words:

*Intelligent oil field, monitoring system, decision support, information system design.*

### REFERENCES

1. Zhdanov S.A., Maksimov M.M., Khavkin A.Ya., Rybitskaya L.P., Tsybulskaaya O.T., Gogonenkov G.N., Evstifeev V.I., Velichkina N.F., Yudin V.A. Proektirovanie razrabotki neftyanykh mestorozhdenii s ispolzovaniem postoyanno deistvuyushchikh geologo-tehnologicheskikh modelei [Design of the development of oil fields using permanent geological and engineering models]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 1997, 3, pp. 43–47.
2. Kats P.M., Kanevskaya R.D. Proektirovanie razrabotki neftyanykh mestorozhdenii s primeneniem gidrorazryva plastov (GRP) na osnove sovremennykh kompyuternykh tekhnologii [Design development of oil fields with the use of hydraulic fracturing based on modern computer technology]. *Povyshenie urovnya dobychi nefti na mestorozhdeniyakh OAO «Noyabrskneftegaz» v 1998–2005: Materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Materials of Science and Technology Conference]. Noyabrsk, 1998. Moscow, VNIIOENG, 1998. pp. 300–304.
3. Merkureva E.A. Analiz effektivnosti ispolzovaniya postoyanno deistvuyushchikh modelei pri proektirovanii razrabotki neftyanykh mestorozhdenii i ikh adaptatsiya k realnym geologo-promyslovym usloviyam. Dis. kand. tekhn. nauk [Analysis of the effectiveness of permanent models in the design and development of oil fields and their adaptation to the actual geological conditions. Cand. tech. sci. diss.]. Ufa, 2008. 146 p.

4. Markelov D.V. «Mestorozhdenie na ladoni» – innovatsionnyi vzglyad na perspektivu intellektualnykh mestorozhdenii [«The field in the palm of your hand» – an innovative look at the future of intelligent field]. *Inzhenernaya praktika*, 2010, 9, pp. 43–46.
5. Daier S., El-Khazindar Ya., Khuber M., Ro I., Rid D. «*Intellektualnoe*» zakanchivanie: avtomatizirovanoe upravlenie dobychei [«Intelligent» Total Depth: Automated Production Management]. Schlumberger. 2013. Available at: [http://www.slb.ru/userfiles/file/Oilfield%20Review/2007/winter/1 %20Intelligent Completion.pdf](http://www.slb.ru/userfiles/file/Oilfield%20Review/2007/winter/1%20Intelligent%20Completion.pdf) (accessed 9 February 2013).
6. Kravtsov M. «*Intellektualnoe*» mestorozhdenie: novye vozmozhnosti i novye resheniya [«Intelligent» oilfield, new opportunities and new solutions]. OZNA. 2013. Available at: [http://ozna.ru/presscenter/articles/detail.php? SECTION\\_ID=&ELEMENT\\_ID=1414](http://ozna.ru/presscenter/articles/detail.php?SECTION_ID=&ELEMENT_ID=1414) (accessed 9 February 2013).
7. Bulygin D.V., Kurbanbaev M.I., Dosmukhambetov M.D., Engels A.A. *Kontseptsiya sozdaniya otraslevogo programmnoy produkta respubliki Kazakhstan dlya proektirovaniya, razrabotki i monitoringa geologo-tehnicheskikh meropriyatii* [The concept of Republic of Kazakhstan software for the design, development and monitoring of geological engineering]. Delta Oil Proekt. 2013. Available at: <http://do-project.ru/docs/2011-1.pdf>, (accessed 20 June 2013).
8. Silich V.A., Silich M.P. *Teoriya sistem i sistemnyi analiz* [Theory of systems and systems analysis]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2010. 218 p.
9. *Osnovnye printsipy proektirovaniya IS* [The Basic principles of information system design]. Materialy po informatsionnym tekhnologiyam [Information Technology Materials]. 2013. Available at: <http://inftis.narod.ru/pis/pis-p4-2.htm> (accessed 9 February 2013).
10. *Proektirovanie informatsionnykh system* [Design of Information Systems]. Univer. 2013. Available at: <http://univer-nn.ru/it/proektirovanieAIS.php> (accessed 9 June 2013).
11. Silich V.A., Yampolskii V.Z., Savelyev A.O., Komagorov V.P., Alekseev A.A., Grebenshchikov S.A. Primenenie tekhnologii OMSD dlya modelirovaniya sistemy planirovaniya geologo-tehnicheskikh meropriyatii [The using OMSD technology for geological engineering simulation]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 42–46.
12. Silich M.P. *Informatsionnaya tekhnologiya proektirovaniya slozhnykh sotsialno-ekonomicheskikh sistem na osnove obektno-orientirovannoy metodologii modelirovaniya. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Information technology for design of complex socio-economic systems based on object-oriented methodology Dr. techn. sci. diss.]. Tomsk, 2005. 360 p.
13. *Ponyatie edinogo informatsionnogo prostranstva* [The concept of a common information space]. Mir Web. 2013. Available at: [http://pautina34.ru/? p=192](http://pautina34.ru/?p=192) (accessed 9 June 2013).
14. *Konsolidatsiya dannykh – klyuchevye ponyatiya* [Key concepts of data consolidation]. Korporativnyi menedzhment. 2013. Available at L: <http://www.cfin.ru/itm/olap/cons.shtml> (accessed 9 June 2013).
15. Paklin N.B., Oreshkov V.I. *Biznes-analitika: ot dannykh k znaniyam* [Business Intelligence: from data to knowledge]. Saint Petersburg, Piter, 2010. 704 p.
16. *Upravlenie informatsiey* [Information Management]. Lukoil-Inform. 2013. Available at: [http://lukoil-inform.ru/main/content.asp?art\\_id=2964](http://lukoil-inform.ru/main/content.asp?art_id=2964) (accessed 9 June 2013).

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ СИМВОЛОВ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

П.А. Хаустов, Д.С. Григорьев, В.Г. Спицын

Томский политехнический университет  
E-mail: eXceibot@sibmail.com; \_tryGX@sibmail.com.

*Существует множество подходов к решению задачи оптического распознавания символов. Одним из них является нейросетевой метод распознавания, в котором для классификации используется нейронная сеть с топологией многослойного перцептрона. Нами разработан и представлен метод для анализа и классификации символов на основе применения вейвлет-преобразования для сокращения пространства признаков и вероятностной нейронной сети. Преимуществом вероятностной нейронной сети как классификатора является возможность использования вероятностного смысла выходных значений сети для улучшения качества распознавания. Осуществлен выбор оптимальной конфигурации параметров метода. Проанализированы результаты численных экспериментов по распознаванию символов, и проведена оценка быстродействия метода. В качестве исходных данных для тестирования предложенного метода использовались наборы символов с наличием пиксельного шума. Предложенный метод показал приемлемые результаты в 98 % правильно классифицированных символов.*

### **Ключевые слова:**

*Оптическое распознавание символов, вероятностная нейронная сеть, вероятностные оценки, вейвлет-преобразование, вейвлеты Хаара.*

### **Введение**

Оптическое распознавание символов представляет собой механический или электронный перевод изображений рукописного, машинописного или печатного текста в текстовые данные – последовательность кодов, использующихся для представления символов в вычислительных системах. Алгоритмы оптического распознавания символов широко используются для конвертации книг и документов в электронный вид, для автоматизации систем учёта в бизнесе или для публикации текста на веб-страницах.

Распознавание латинских символов в печатном тексте с высокой степенью точности в настоящее время возможно лишь в случае работы с чёткими изображениями, такими как сканированные печатные документы. Точность при такой постановке задачи превышает 99 %, стопроцентная точность может быть достигнута лишь путем последующего редактирования человеком.

Достаточно часто для решения задачи оптического распознавания символов используют искусственные нейронные сети, которые обладают высоким быстродействием. Однако информация о классе, который искусственная нейронная сеть считает наиболее подходящим для заданного объекта, не всегда является достаточной для решения той или иной задачи. Иногда возможны ситуации, при которых один объект может быть в равной мере отнесен к двум и более классам. В таких случаях возникает необходимость в классификаторе, который позволит определять для каждого объекта некоторую степень принадлежности каждому из классов, аналогичную функции принадлежности в теории нечетких множеств. Для задачи оптического распознавания символов подобного рода информацию можно использовать для дальнейшего анализа результатов распознавания в системе оптического распознавания текстов.

Целью данной работы является разработка метода оптического распознавания символов, позволяющего получить оценку степени уверенности в результатах распознавания, а также определение оптимального набора дескрипторов для минимизации пространства признаков.

### **Исходные данные**

Исходные данные, которые были использованы при апробации метода оптического распознавания символов, представляют собой набор изображений отсканированных документов с присутствием пиксельного шума.

Примерная классификация типов пиксельного шума на изображениях приведена в таблице.

### **Вероятностная нейронная сеть**

Существенным преимуществом нейронных сетей является их высокое быстродействие, поэтому хорошим решением задачи распознавания символов являлась бы нейронная сеть, способная определять степень принадлежности образа к каждому из классов.

Одним из уже существующих решений является вероятностная модификация RBF-сети, которая носит название вероятностной нейронной сети (PNN-сеть) [1, 2]. По своей сути искусственная нейронная сеть такого типа решает задачу оценки плотности вероятности по имеющимся данным. Решение такой задачи в данном случае основано на так называемых ядерных оценках.

Фактически делается предположение о том, что существование наблюдения в некоторой точке пространства обеспечивает некоторую плотность вероятности в этой точке. Кластеры из близко лежащих точек указывают на то, что в этом месте плотность вероятности достаточно велика. По расстоянию от ядерных центров оценивается доверие к уровню плотности вероятности. Для оценки общей плотно-

сти вероятности используется суммарное значение некоторой функции во всех точках наблюдения. Такую функцию называют ядерной функцией. Зачастую в качестве ядерной функции используют распределение Гаусса. При больших размерах обучающей выборки такой метод дает достаточно точное приближение к истинной плотности вероятности.

Вероятностная нейронная сеть имеет три слоя: входной, радиальный и выходной. Входной слой имеет произвольную размерность. Каждый нейрон радиального слоя соответствует одному элементу обучающей выборки. Количество нейронов выходного слоя равняется количеству классов. Каждый нейрон выходного слоя соединен с элементами радиального слоя, принадлежащими к соответствующему ему классу.

Таким образом, для получения значения нейрона выходного слоя достаточно сложить отклики нейронов радиального слоя, с которыми он соединен. Для PNN-сети выход, соответствующий некоторому классу, описывается выражением (1):

$$y = \frac{1}{N\sigma^n} \sum_{k=1}^N \varphi\left(\frac{\|X - X^k\|}{\sigma}\right), \quad (1)$$

где  $n$  – размерность входного вектора,  $N$  – размер обучающей выборки,  $\sigma$  – параметр сглаживания,  $\varphi$  – Гауссова функция.

Выбор параметра сглаживания  $\sigma$  осуществляется отдельно для каждой задачи. Слишком большие значения  $\sigma$  приведут к потере деталей, слишком маленькие, наоборот, приведут к большому обобщению.

Таким образом, преимуществом PNN-сети является высокое быстродействие и вероятностный смысл значений выходных нейронов. Недостатком является зависимость количества нейронов скрытого слоя от размерности обучающей выборки [3, 4].

Сеть была апробирована на benchmark-наборе данных proben1, в результате чего было отмечено, что качество распознавания PNN-сети паритетно с качеством распознавания общеизвестных нейросетевых алгоритмов.

Обучение PNN-сети осуществляется с высокой степенью быстродействия. Ведь PNN-сеть не нуждается в обучении, достаточно лишь задать структуру радиального слоя этой сети.

Стоит отметить, что еще одним преимуществом PNN-сети является ее детерминированность. Результат распознавания при фиксированной обучающей выборке и фиксированном параметре  $\sigma$  всегда одинаков.

В результате проведенного исследования можно утверждать, что вероятностная нейронная сеть является хорошим инструментом для решения задачи классификации. Процент правильно выполненной классификации ничуть не уступает остальным вариациям нейронных сетей, однако появляется возможность использовать вероятностный смысл выходных значений для улучшения качества классификации или использования PNN-сети в качестве одного из классификаторов при комбинированном методе распознавания.

Таблица. Примерная классификация типов пиксельного шума

№	Изображение	Значение	Описание
1		a	Шум, вызывающий ошибки сегментации. Представляет собой отдельный набор пикселей, расположенных на небольшом (6–10 пикс.) расстоянии от символа. Правильность распознавания почти всегда обеспечивает работа словаря, так как остальные символы в слове могут быть сегментированы и распознаны сетью верно
		h	
		k	
		n	
		s	
2		d	Шум, представляющий собой пятна, перекрывающие символ, размерами до 50 % площади самого символа. Приемлемый процент распознавания достигается совокупностью работы сети с дескрипторами и словаря
		t	
		o	
		t	
		5	
3		p	Шум, представляющий собой пятна с площадью 1–8 пикселей, частично перекрывающий символ. Практически во всех случаях удается распознать символ. Наиболее часто встречающийся вид пиксельного шума
		m	
		e	
		t	
		t	
4		u	Шум, представляющий собой пятна площадью более половины площади символа. Символы практически не распознаются. Часто оказываются зашумлены и соседние символы. Возможность распознать слово, а соответственно и символ зависит от длины слова и количества загрязненных соседних символов
		r	
		g	
		e	
		t	
5		y	Шум, представляющий собой отсутствие составляющих пикселей. Практически всегда удается распознать символ
		e	
		i	
		l	
		e	

Очевидно, задача оптического распознавания символов является частным случаем задачи классификации образов, применения вероятностной нейронной сети для которой уже было описано ранее. Остается лишь определиться с пространством признаков, которые будут подаваться на входной слой такой сети.

Пусть все изображения символов, которые требуется классифицировать, являются бинарными изображениями фиксированного размера  $32 \times 32$  пикселей. В таком случае можно передавать на входы вероятностной нейронной сети значения яркости каждого из пикселей, которые всегда будут равны нулю или единице. Для таких дескрипторов изображения размерность пространства будет равна количеству бит в изображении (для указанных размеров это значение равно 1024).

Фактически при таком представлении каждое изображение будет являться некоторой вершиной 1024-мерного гиперкуба. В таком случае можно утверждать, что расстояние будет пропорционально количеству бит, которые в двух сравниваемых изображениях имеют различный цвет. То есть при таком представлении Евклидова метрика фактически идентична метрике манхэттенской с точностью до константы, на которую производится умножение.

Таким образом, при достаточных размерах обучающей выборки вероятностная нейронная сеть будет находить множество вершин гиперкуба, принадлежащих к одному и тому же классу, суммарное расстояние до которого в нем минимально.

Существенным недостатком такого подхода является достаточно большая размерность пространства признаков.

#### Формирование пространства признаков меньшей размерности

Вейвлеты являются приемлемым инструментом для обработки изображений и сигналов, позволяющим проводить анализ в нескольких временных масштабах локальных свойств. В частности, при помощи вейвлет-преобразования осуществляется сжатие. При оптимальном выборе базисной вейвлет-функции и уровня преобразования можно свести потерю качества к минимуму [5–7].

Применяемая в данной работе вероятностная нейронная сеть взаимодействует с набором вейвлет-дескрипторов и с матрицей вариаций яркости. Одной из целей данной работы является определение оптимального набора дескрипторов для минимизации пространства признаков.

В работе для получения коэффициентов разложения исходного изображения выбирается метод кратномасштабного анализа. Как известно, кратномасштабный анализ инвариантен к целочисленным сдвигам по временной оси и по отношению к растяжениям, кратным степеням двойки.

#### Получение дескрипторов

Так как цифровое изображение представляет собой функцию двух аргументов  $f(x, y)$ , то задав двумерные разделимые масштабирующую функцию и вейвлет-функции, обобщим алгоритм быстрого вейвлет-преобразования на двумерный случай.

Семейство базисных функций, определенное с помощью операций сдвигов и изменений масштаба, имеет вид:

$$\varphi_{j,m,n}(x, y) = 2^{j/2} (2^j x - m, 2^j y - n), \quad (2)$$

$$\psi_{j,m,n}^i(x, y) = 2^{j/2} \psi^i(2^j x - m, 2^j y - n). \quad (3)$$

$$i = \{H, D, V\}. \quad (4)$$

Индекс  $i$  в выражениях (2) и (3) служит для идентификации направленных вейвлетов, измеряющих вариации значений функции – изменения яркости для изображения по разным направлениям: вдоль столбцов, вдоль строк и вдоль диагоналей.

Определим дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) изображения – функции  $f(x, y)$  для изображений размера  $M \times N$ . Аналогично разложению в ряд Фурье разложение в вейвлет-ряд ставит в соответствие непрерывной функции последовательность коэффициентов. В нашем случае разложение определяется следующими преобразованиями:

$$W_{\varphi}(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \varphi_{j_0, m, n}(x, y),$$

$$W_{\psi}^i(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \psi_{j, m, n}^i(x),$$

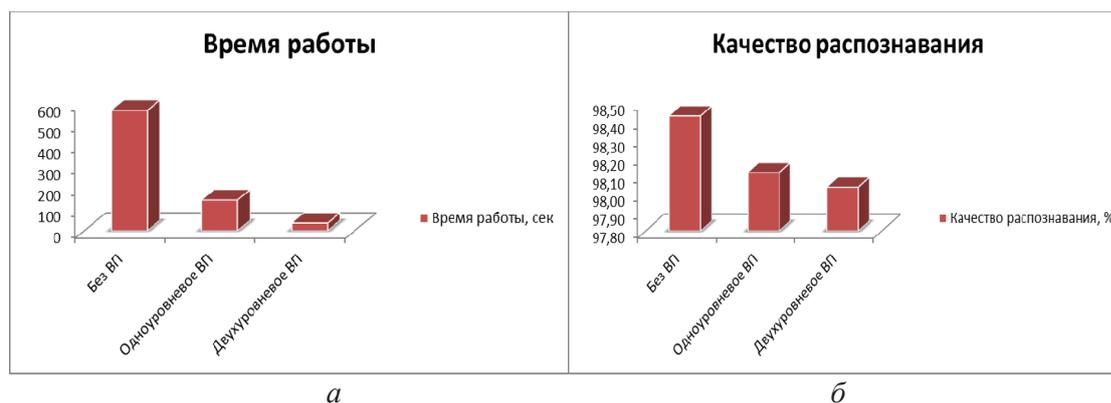
$$i = \{H, D, V\}.$$

Выражения (3) и (4) являются соответственно коэффициентами аппроксимации и коэффициентами детализации, где  $j_0$  – приближенный начальный масштаб, и коэффициенты  $W_{\varphi}(j_0, m, n)$  определяют приближение функции  $f(x, y)$  в масштабе  $j_0$ . Коэффициенты  $W_{\psi}^i(j_0, m, n)$  – горизонтальные, вертикальные и диагональные коэффициенты детализации для масштабов, больших чем  $j_0$ .

ДВП в нашем случае реализуется с помощью частотной фильтрации и прореживающей выборки. При этом происходит вычисление одномерного быстрого вейвлет-преобразования (БВП) по строкам функции, а затем по столбцам от уже полученного результата [6].

Тип используемой вейвлет-функции – функция Хаара. 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.

После применения ДВП извлекались соответственно коэффициенты аппроксимации и коэффициенты детализации. В дальнейшем использовался только набор коэффициентов аппроксимации: в качестве точки отсчета для последующего применения блока фильтров БВП, а также 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 точности распознавания.



**Рисунок.** а) Время работы метода с различными наборами дескрипторов; б) точность распознавания с различными наборами дескрипторов

В итоге каждый этап фильтрации дает на выходе четыре изображения, а точнее четыре «части» исходного изображения  $W_\varphi, W\psi^H, W\psi^V, W\psi^D$ , где каждое меньше исходного в 2 раза. Эти изображения представляют собой результат прореживающей выборки с фактором 2 по всем направлениям к массиву [7–9]. Элементами этого массива являются скалярные произведения изображения  $f(x,y)$  на двумерные масштабирующие и вейвлет-функции каждого соответствующего масштаба [8, 10].

#### Результаты тестирования метода

Тестирование предложенного метода осуществлялось на тестовой выборке из 48820 элементов, которая была составлена из изображений, полученных в результате сегментации набора отсканированных текстов с наличием пиксельного шума.

Тестирование производилось для трех методов получения дескрипторов: без использования вейвлет-преобразования (1024 дескриптора), с использованием одноуровневого вейвлет-преобразования (256 дескрипторов) и с использованием двухуровневого вейвлет-преобразования (64 дескриптора). Для каждого из методов была определена точность распознавания (в процентах от общего размера тестовой выборки) и время выполнения (в секундах). Результаты тестирования можно отобразить с помощью следующих диаграмм (рисунок).

Как можно заметить, существенное улучшение быстродействия достигается за счет использования вейвлет-преобразований. При использовании

одноуровневого вейвлет-преобразования время работы уменьшается примерно в 4 раза, при использовании двухуровневого вейвлет-преобразования – примерно в 16 раз. Такое уменьшение легко объясняется линейной зависимостью времени выполнения от размерности пространства признаков.

При таком существенном улучшении быстродействия и уменьшении размерности пространства признаков точность распознавания уменьшается не больше, чем на 0,4 %. Это говорит о том, что вейвлет-преобразование позволяет существенно улучшить быстродействие, ценой незначительного ухудшения качества распознавания.

#### Заключение

1. Предложено использование вероятностной нейронной сети для решения задачи оптического распознавания символов с целью последующего использования значений выходов нейронной сети для улучшения качества распознавания в системах оптического распознавания текстов.
2. Предложено применение дискретного вейвлет-преобразования для уменьшения размерности пространства признаков с целью улучшения быстродействия алгоритма распознавания.
3. В дальнейшем планируется использование предложенного метода в системе оптического распознавания текстов совместно с алгоритмами словарной работы и предобработки изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-08-00296а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2000. – 224 с.
2. Тархов Д.А. Нейронные сети. Модели и алгоритмы. – М.: Радиотехника, 2005. – 256 с.
3. Probabilistic Neural Networks. 2004. URL: [http://courses.cs.tamu.edu/rgutier/cpsc636\\_s10/specht1990pnn.pdf](http://courses.cs.tamu.edu/rgutier/cpsc636_s10/specht1990pnn.pdf) (дата обращения: 22.05.2013).
4. An Introduction to Probabilistic Neural Networks. 2003. URL: <http://www.psi.toronto.edu/~vincent/research/presentations/PNN.pdf> (дата обращения: 22.05.2013).
5. Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J. Wavelets and their applications. – London: ISTE, 2007. – 352 с.

6. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. – М.: Техносфера, 2004. – 280 с.
7. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 464 с.
8. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
9. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. – М.: И.Д. Вильямс, 2006. – 1104 с.

Поступила 03.09.2013 г.

UDC 004.352.242

## THE DEVELOPMENT OF OPTICAL CHARACTER RECOGNITION APPROACH ON THE BASIS OF JOINT APPLICATION OF PROBABILISTIC NEURAL NETWORK AND WAVELET TRANSFORM

P.A. Khaustov, D.S. Grigoryev, V.G. Spitsyn

Tomsk Polytechnic University

There are a lot of approaches to solve the problem of optical character recognition. One of them is the approach based on neural networks. The authors have proposed and implemented an approach of analyzing and classification based on wavelet transformation for reducing the feature space and probabilistic neural network for recognition. The main advantage of probabilistic neural network is the probabilistic significance of its output neurons which can be used to improve the quality of recognition. Optimal values of parameters were selected for such approach. The results of numerical experiments were analyzed and the time-performance of this approach was assessed. The set of noisy character images was used to assess the proposed approach. This method showed 98 % of acceptable recognition.

### Key words:

Optical character recognition, probabilistic neural network, probabilistic assessment, wavelet transform, wavelets.

### REFERENCES

1. Kruglov V.V., Dli M.I., R.Yu. Golunov. *Nechetkaya logika i iskusstvennyye neyronnyye seti* [Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2000. 224 p.
2. Tarkhov D.A. *Neyronnyye seti. Modeli i algoritmy* [Neural Networks. Models and Algorithms]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2005. 256 p.
3. *Probabilistic Neural Networks*. 2004. Available at: [http://courses.cs.tamu.edu/rgutier/cpsc636\\_s10/specht1990pnn.pdf](http://courses.cs.tamu.edu/rgutier/cpsc636_s10/specht1990pnn.pdf) (accessed 22 May 2013).
4. *An Introduction to Probabilistic Neural Networks*. 2003. Available at: <http://www.psi.toronto.edu/~vincent/research/presentations/PNN.pdf> (accessed 22 May 2013).
5. Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J. *Wavelets and their applications*. London, ISTE, 2007. 352 p.
6. Blatter K. *Veyvlet-analiz. Osnovy teorii* [Wavelet-analysis. The Main Theory]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 280 p.
7. Dobeshi I. *Desyat lektiy po veyvletam* [Ten Lectiures about Wavelets]. Izhevsk, Reguljarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2001. 464 p.
8. Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital Image Processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 1072 p.
9. Osovskiy S. *Neyronnyye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural Networks for Data Processing]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 344 p.
10. Haykin S. *Neyronnyye seti* [Neural Networks]. Moscow, Williams, 2006. 1104 p.

УДК 004.352.242

## УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА МЕТОДА ОПТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТОВ С ПОМОЩЬЮ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ, КУРВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ И АЛГОРИТМОВ СЛОВАРНОГО ПОИСКА

Д.С. Григорьев, П.А. Хаустов, В.Г. Спицын

Томский политехнический университет  
E-mail: \_tryGX@sibmail.com, eXceibot@sibmail.com

Оптическое распознавание символов является комплексной задачей, для решения которой не существует определенного алгоритма. Существует множество подходов и методов для решения данной задачи. Предложенный ранее метод, основанный на совместном применении вейвлет-преобразования для сокращения размерности пространства признаков и вероятностной нейронной сети для классификации, показал приемлемые результаты. Однако предложенный метод может быть дополнен и улучшен алгоритмами предварительной и пост-обработки. Предложен метод предобработки отсканированных изображений на основе адаптивного порогового преобразования в алгоритмах дискретных вейвлет и курвлет-преобразований. Проведены численные эксперименты по выявлению наиболее результативного алгоритма для предобработки. В качестве алгоритма пост-обработки предложен метод улучшения качества распознавания текста на основе алгоритма словарного поиска с использованием динамического программирования.

### Ключевые слова:

Пороговое преобразование, вейвлет-преобразование, курвлет-преобразование, динамическое программирование, префиксное дерево, словарный поиск.

### Введение

Системы оптического распознавания текста состоят из следующих основных блоков, предполагающих аппаратную или программную реализацию:

- сегментации элементов текста;
- предобработки изображений;
- выделения признаков;
- распознавания символов;
- постобработки результатов распознавания.

После использования алгоритма оптического распознавания символов возникает необходимость в улучшении качества распознавания текста. Для того чтобы улучшить качество распознаваемого текста без изменения механизма решения задачи оптического распознавания символов, вводятся блоки предобработки изображений и постобработки результатов оптического распознавания.

### Предобработка изображений

Как известно, вейвлет-преобразование широко применяется для анализа сигналов, а также зарекомендовало себя как эффективный инструмент для сжатия и предобработки изображений [1, 2]. Приемлемые результаты исследований в указанных работах обуславливают выбор метода дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) для дальнейшего применения. Однако при вейвлет-преобразовании исходные данные претерпевают значительные потери при растяжении и вращении, также в преобразовании отсутствует пространственная ориентированность.

Курвлет-преобразование (curve – кривая, изгиб; curvelet – маленький изгиб) в данном случае является более подходящим инструментом для определения свойств ориентированности объекта на изображении, обеспечивая оптимальное представление о разреженности, предоставляя максимальную концентрацию энергии вдоль краев объекта [3]. Курвлет-преобразование является

многомерным, многоуровневым и локализованным в окне масштаба, пропорционального следующему отношению длины и ширины: «длина<sup>2</sup>~ширина» [4]. Одной из целей данной работы является выявление наиболее подходящего алгоритма предобработки зашумленного изображения.

### Курвлет-преобразование

Курвлеты – базовые элементы с высокой чувствительностью к ориентации и высокой анизотропностью [3, 4]. Дискретное курвлет-преобразование функции вариации яркости изображения  $f(x,y)$  использует диадические последовательности масштабов и банков фильтров  $(P_0f, \Delta_1f, \Delta_2f, \dots)$ . Высококачественные фильтры  $\Psi_{2^s}$  взаимодействуют с частотами области  $|\xi| \in [2^{2s}, 2^{2s+2}]$  и обладают рекурсивной конструкцией  $\Psi_{2^s}(x) = 2^{4s}\Psi(2^{2s}x)$ , а низкочастотный фильтр  $\Phi_0$  взаимодействует с частотами области  $|\xi| \leq 1$ . Субполосное разложение выполняется при помощи операции свертки:  $\Delta_s f = \Psi_{2^s}^* f$ ,  $P_0 f = \Phi_0^* f$ . Схема алгоритма курвлет-преобразования приведена на рис. 1.

1. Субполосное разложение. Функция вариаций яркости изображения раскладывается в набор субполос:  $f \rightarrow (P_0f, \Delta_1f, \Delta_2f, \dots)$ . Каждый набор  $\Delta_s f$  содержит детали различных частот:  $P_0$  – фильтр нижних частот,  $\Delta_1, \Delta_2, \dots$  – фильтры высоких частот. Исходное изображение может быть восстановлено по формуле (1):

$$f = P_0(P_0f) + \sum_s \Delta_s(\Delta_s f). \quad (1)$$

При этом выражение (2) для сохранения энергии:

$$\|f\|_2^2 = \|P_0(P_0f)\|_2^2 + \sum_s \|\Delta_s(\Delta_s f)\|_2^2. \quad (2)$$

2. «Гладкое» разделение. Каждая субполоса локализуется в плавающем окне соответствующего масштаба,  $\Delta_s \rightarrow (w_q \Delta_s f)_{q \in Q_s}$ . Здесь  $w_q$  – это набор окон, локализованных вокруг диадических квадратов:

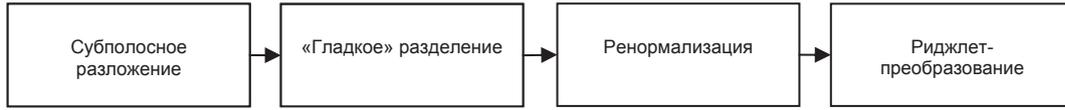


Рис. 1. Основные этапы алгоритма курвлет-преобразования

$$Q = [k_1 / 2^S, (k_1 + 1) / 2^S] \times [k_2 / 2^S, (k_2 + 1) / 2^S].$$

Умножая  $\Delta_s f$  на  $w_Q$ , производим разделение функции на «квадраты»  $h_Q = w_Q \cdot \Delta_s f$ .

3. Ренормализация. Происходит центрирование каждого диадического квадрата к единичному:  $[0, 1] \times [0, 1]$ . Для каждого  $Q$  оператор  $T_Q$  определен выражением (3):

$$(T_Q f)(x_1, x_2) = 2^S f(2^S x_1 - k, 2^S x_2 - k_2). \quad (3)$$

Каждый квадрат ренормализуется по формуле (4):

$$g_Q = T_Q^{-1} h_Q. \quad (4)$$

4. Риджлет-преобразование [5]. Разделение частотной области на диадическую «корону» определяется как  $|\xi| \in [2^s, 2^{s+1}]$ . Каждый элемент риджлет-преобразования в частотной области задается выражением (5):

$$\hat{\rho}_\lambda(\xi) = \frac{1}{2} |\xi|^{-\frac{1}{2}} (\hat{\psi}_{j,k}(|\xi|) \cdot \omega_{i,l}(\theta) + \hat{\psi}_{j,k}(-|\xi|) \cdot \omega_{i,l}(\theta + \pi)), \quad (5)$$

где  $\omega_{i,l}$  – периодические вейвлеты, определенные на  $[-\pi, \pi]$ ;  $i$  – угловой масштаб и  $l \in [0, 2^{i-1} - 1]$  – расположение угла;  $\psi_{j,k}$  – вейвлеты Мейера на  $\mathcal{R}$ ;  $j$  – масштаб риджлета и  $k$  – расположение риджлета. Каждый нормализованный квадрат подвергается анализу в риджлет-системе  $\alpha_{(Q,\lambda)} = \langle g_Q, \rho_\lambda \rangle$ , где каждый фрагмент обладает соотношением сторон  $2^{-2s} \times 2^{-s}$ . После ренормализации квадрат обладает частотой локализованной в полосе  $|\xi| \in [2^s, 2^{s+1}]$  [3–5, 6].

#### Обратное курвлет-преобразование

Обратное курвлет-преобразование происходит в четыре основных этапа:

1. Риджлет-синтез (формула (6)):

$$g_Q = \sum_l \hat{\rho}_{(Q,\lambda)} \cdot c_\lambda. \quad (6)$$

2. Ренормализация (формула (7)):

$$h_Q = T_Q g_Q. \quad (7)$$

3. «Гладкая» интеграция (формула (8)):

$$\Delta_s f = \sum_{Q \in \mathcal{Q}_s} w_Q h_Q. \quad (8)$$

4. Субполосная реконструкция (формула (9)):

$$f = P_0(P_0 f) + \sum_s \Delta_s(\Delta_s f). \quad (9)$$

#### Удаление шумов

Входное изображение представлено функцией вариации яркости двух переменных  $f(x, y)$ . Пусть зашумленное изображение  $f_n(x, y) = f(x, y) + \sigma z_g(x, y)$ , где  $\sigma$  – это стандартное отклонение шума, а  $z_g(x, y)$  – значение белого шума с нулевым математическим ожида-

нием ( $\mu_g = 0$ ) и единичной дисперсией  $\sigma_g^2 = 1$ . Ставится задача нахождения оптимальной конфигурации фильтра для очистки зашумленного изображения перед его последующей бинаризацией. Очищенное изображение на следующем этапе подвергается сегментации с целью выделения отдельных символов для распознавания. В данной работе представлены два метода для удаления шумов на изображениях.

В первом методе удаление шумов осуществляется на основе применения вейвлет-преобразования, а во втором методе – на основе применения курвлет-преобразования.

#### Метод вейвлет-преобразования

Метод предобработки, основанный на применении вейвлет-преобразования, представлен на рис. 2.

На представленной схеме обозначены основные блоки этапа предобработки изображения. На поступившее исходное изображение добавляется импульсные и Гауссовы шумы. Далее изображение подвергается двухуровневому дискретному вейвлет-преобразованию с базисной функцией Хаара для извлечения соответственно коэффициентов детализации и коэффициентов аппроксимации. Основным этапом шумоподавления является применение порога  $\lambda$  для набора коэффициентов детализации, который задается выражением (10):

$$\lambda_j = \sigma \sqrt{2 \log(N_j)}. \quad (10)$$

Формула порогового преобразования приведена в [2]. Здесь индекс  $j$  – уровень преобразования, а  $N_j$  – размер матрицы коэффициентов на соответствующем уровне преобразования. Значение  $\sigma$  вычисляется при помощи медианного абсолютного отклонения высокочастотных вейвлет-коэффициентов детализации (11):

$$\sigma = \frac{\text{median}(|\omega_k|)}{0,6745}. \quad (11)$$

На следующем этапе вычисляется обратное дискретное вейвлет-преобразование, и в результате на выходе получается очищенное изображение. Затем очищенное изображение подвергается бинаризации.

#### Метод курвлет-преобразования

Метод предобработки, основанный на применении курвлет-преобразования, представлен на рис. 3.

После добавления шума изображение подвергается дискретному курвлет-преобразованию. Затем извлекаются соответствующие зашумленному изображению курвлет-коэффициенты. Происходит вычисление стандартного отклонения значения шума, и производится оценка порогового преобразования для каждого масштаба аналогично (10). После оцен-

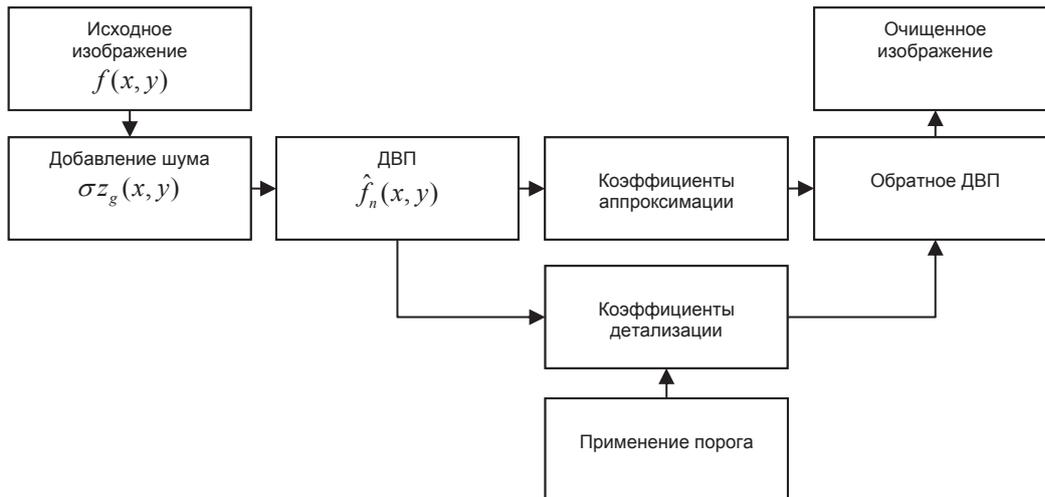


Рис. 2. Схема метода предобработки при помощи вейвлет-преобразования



Рис. 3. Схема метода предобработки при помощи кривлет-преобразования

ки применяется пороговое преобразование для кривлет-коэффициентов [6]. На следующем этапе производится обратное кривлет-преобразование. Очищенное изображение подвергается бинаризации.

удаления гауссовского и импульсного шума на изображениях представлены на рис. 4. Обработке подвергалось изображение, представленное на рис. 4, б.

Полученные результаты показывают, что алгоритм, основанный на кривлет-преобразовании, позволяет получить изображение более высокого качества по сравнению с алгоритмом, основанным на вейвлет-преобразовании.

#### Словарный поиск

В случае распознавания не отдельных символов, а целых слов или даже текстов вероятностный смысл выходов PNN-сети рационально использовать для поиска наиболее вероятного совпадения текущего слова с некоторым словом в словаре [7]. Количество слов в словаре, как правило, достигает нескольких сотен тысяч, поэтому возникает необходимость в алгоритме, обладающем высоким быстродействием.

Тривиальным решением является использование взвешенного расстояния Левенштейна, где весами являлись бы вероятности с выходов PNN-сети, а также вероятности корректности распознавания и сегментации, полученные статистическими методами. Фактически при таком подходе будет определяться математическое ожидание расстояния Левенштейна [8] для всех возможных вариантов распознавания и сегментации слова. Для определения расстояния Левенштейна используется метод динамического программирования, который, в свою очередь, использу-

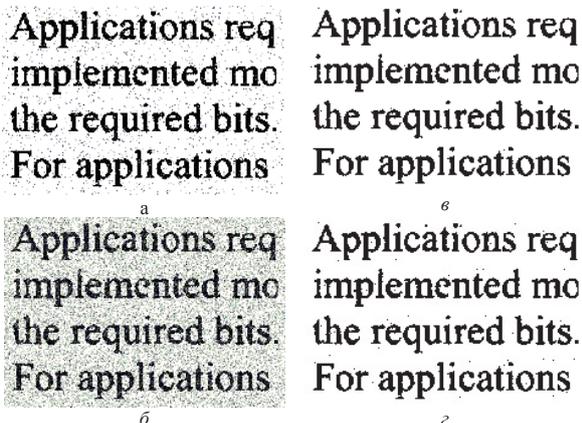


Рис. 4. а) Исходное изображение с импульсным шумом; б) исходное изображение, зашумленное при помощи гауссовского и импульсного шумов; в) выходное бинаризованное изображение после обработки методом кривлет-преобразования; г) выходное бинаризованное изображение после обработки методом вейвлет-преобразования

#### Сравнение результатов вейвлет и кривлет-преобразований

Результаты численных экспериментов по сравнению вейвлет и кривлет-преобразований для

ет рекуррентное задание функции  $F(c_1, c_2)$ , заданной выражением (12) – значение функции расстояния Левенштейна для суффиксов двух строк, начинающихся с позиций  $c_1$  и  $c_2$  соответственно:

$$F(c_1, c_2) = \min(F(c_1 + 1, c_2) \cdot W_1, F(c_1, c_2 + 1) \times \\ \times W_2, F(c_1 + 1, c_2 + 1) \cdot W_3). \quad (12)$$

Существенным недостатком такого подхода является необходимость в нахождении расстояния Левенштейна до каждого из слов в словаре. Стоит учесть, что сложность вычисления расстояния Левенштейна линейно зависит от произведения длины распознаваемого слова и длины словарного слова. Учитывая, что размер словаря может быть достаточно большим, данный алгоритм обладает недостаточным быстродействием – его асимптотическая оценка  $O(KL^2)$ , где  $K$  – количество слов в словаре,  $L$  – среднестатистическая длина слова. Однако преимуществом этого алгоритма является то, что он рассматривает каждое слово словаря.

Для того чтобы улучшить быстродействие этого алгоритма, можно воспользоваться тем фактом, что достаточно большое количество слов в большинстве языков имеют общий префикс. Так, например, в английском языке слова «preposition», «predicate» и «present» имеют одинаковый префикс «pre». Очевидно, для подобных префиксов функцию расстояния Левенштейна считать более одного раза не имеет смысла. Следовательно, имеет смысл использовать следующее улучшение алгоритма. Для хранения словаря целесообразно применить префиксное дерево [9]. В префиксном дереве каждому ребру соответствует определенный символ. Каждое слово в этом дереве представлено путем от корня к некоторой вершине, которая является терминальной. Терминальными вершинами являются только вершины, в которых заканчивается путь некоторого слова. Теперь при поиске расстояния Левенштейна будет использоваться не позиция символа в конкретном слове, а вершина префиксного дерева. В таком случае для всех возможных префиксов значение функции расстояния Левенштейна будет посчитано ровно один раз. Фактически расстояние Левенштейна будет считаться параллельно для всех слов с одинаковым префиксом.

На рис. 5 можно увидеть префиксное дерево, построенное по словам: «car», «card», «carry», «cart», «cat», «cel», «celery», «close», «closely», «closet» и «clue». Терминальные вершины, соответствующие этим словам, выделены черным цветом.

При таком подходе функция расстояния Левенштейна принимает следующий вид:  $F(c, v)$  задается выражением (13), где  $v$  – вершина в префиксном дереве, а  $c$  – текущий символ, для которого будет ищется соответствие при переходе по ребрам из вершины  $v$ :

$$F(c, v) = \min(F(c + 1, v_i) \cdot W_i). \quad (13)$$

При переходе по ребрам дерева значение вероятности распознавания соответствующего символа является значением вероятности перехода в вершину, в которую ведет это ребро. Таким образом, наиболее

вероятен переход по ребру, соответствующему символу, к которому отнесен соответствующий образ с наибольшей вероятностью. Фактически функция  $F(v, c)$  позволяет найти наиболее вероятный путь в дереве, ведущий к терминальному состоянию.

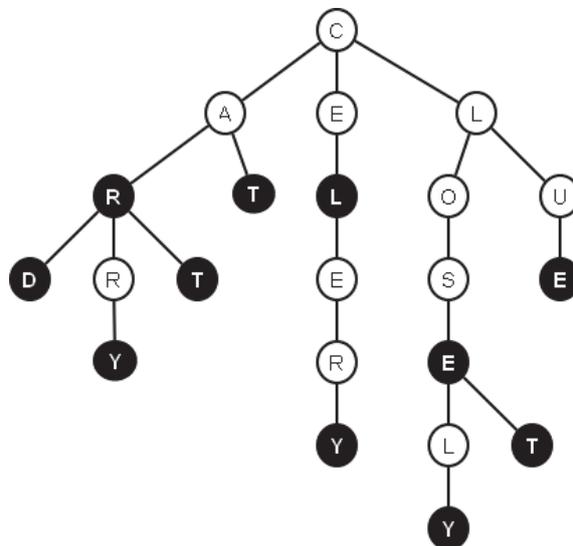


Рис. 5. Пример префиксного дерева

Очевидно, стоит учесть, что при распознавании могла быть допущена ошибка. Для этого необходимо задать некоторую величину вероятности  $P_E$ , с которой PNN-сеть допустила ошибку при распознавании. Значение вероятности  $P_E$  можно определить эмпирическим путем. Тогда с вероятностью  $(P_E/A)$  необходимо осуществлять переход по каждому из ребер, ведущих из вершины  $v$ , где  $A$  – количество ребер, выходящих из вершины  $v$ .

Операции удаления и добавления символа при поиске расстояния Левенштейна используются для учета ошибок сегментации. Вероятность ошибки сегментации  $P_S$  можно так же, как и вероятность ошибки при распознавании  $P_E$ , определить экспериментальным путем.

Можно дать асимптотическую оценку сложности работы полученного алгоритма. Пусть количество вершин в дереве префиксов равно  $V$ , а среднестатистическая длина слова в языке равна  $L$ , тогда асимптотическая оценка алгоритма равна  $O(VL)$ . Для реально существующих языков  $V$  намного меньше, чем  $KL$  (из-за большого количества слов с одинаковыми префиксами), отсюда можно сделать вывод, что использование префиксного словарного дерева увеличивает быстродействие алгоритма.

При поиске слова в словаре необходимо учитывать некоторые особенности этого слова. Так, например, необходимо посчитать вероятность того, что первая буква этого слова является заглавной. Если эта вероятность более 0,5, следует пересчитать вероятности принадлежности каждому из классов и при поиске искать то же самое слово, но без учета заглавной буквы. Можно также посчитать математическое ожидание количества заглавных букв, чтобы определять слова, являющиеся

аббревиатурами. Стоит отметить, что предыдущее правило не применимо для аббревиатур, что тоже необходимо учесть.

Для того чтобы не искать в словаре слова, которые содержат маленькое количество букв, можно заранее посчитать математическое ожидание количества букв в слове. Если это значение недостаточно велико, то словарный поиск осуществлять не имеет смысла. Так, например, нет смысла искать в словаре числа или какие-либо численно-буквенные обозначения. Также можно отбрасывать первый и последний символы, если они являются знаками препинания с достаточно большой вероятностью. Такое достаточно часто случается из-за того, что знаки препинания присоединяются к слову в результате сегментации или при наличии небольшого пиксельного шума в строке с этим словом.

Зачастую из-за ошибок сегментации некоторые слова склеиваются с использованием знаков препинания. Подобное возможно из-за пиксельного шума, который ошибочно воспринимается как точка, запятая, апостроф или двоеточие. При этом, казалось бы, поиск по словарю не имеет смысла, ведь даже информация о реальном количестве символов в слове является утерянной. В таком случае возникает необходимость в алгоритме, способном находить наиболее вероятное разбиение полученной лексемы на словарные слова.

Идея алгоритма, предложенного для решения такого рода задачи, также основывается на принципе динамического программирования. Будем считать некоторую последовательность символов словарно-представимой, если она состоит только из знаков препинания или образует слово, которое содержится в словаре. Тогда требуется найти наиболее вероятное разбиение имеющейся лексемы на словарно-представимые последовательности символов. Если применить идею динамического программирования, то для каждого суффикса полученной лексемы можно находить наиболее вероятное разбиение на словарно-представимые последовательности. Для того чтобы найти наиболее вероятное разбиение некоторого суффикса  $P_{SUF}(i)$  достаточно перебрать все последовательности символов, начинающиеся с этой позиции. Затем для каждой из них необходимо найти вероятность  $P_{SUBSTR}(i, j-1)$  того, что эта последовательность является словарно-представимой, умножить ее на вероятность наиболее вероятного разбиения оставшейся суффиксной части лексемы  $P_{SUF}(j)$  и выбрать из всех этих значений максимум (14):

$$P_{SUF}(i) = \max(P_{SUF}(j) \cdot P_{SUBSTR}(i, j-1)). \quad (14)$$

Таким образом, искомое разбиение для суффикса наибольшей длины и будет являться наиболее вероятным разбиением на словарно-представимые последовательности всей лексемы.

#### Результат применения алгоритма словарного поиска

Для апробации предложенного метода был использован электронный словарь «*ewords*», все слова которого хранятся в абстрактном типе данных –

префиксном дереве (trie-дерево). Целесообразность такого способа хранения была обусловлена ускоренным способом подсчета функции Левенштейна для всех слов словаря. Однако для оценки эффективности такого представления данных следует также оценить различия в быстродействии и в потребляемой оперативной памяти.

Для того чтобы сравнить объем памяти, потребляемой при тривиальном способе хранения, с объемом памяти, который требуется для хранения префиксного дерева, достаточно воспользоваться нативными средствами языка C++ и оператором `sizeof`.

Для словаря «*ewords*» были определены следующие значения объема потребляемой памяти. При тривиальном способе хранения задействуется 5419672 байт оперативной памяти. При способе хранения с использованием префиксного дерева – 4520710 байт. Как можно заметить, объемы потребляемой памяти для двух описанных способов хранения паритетны. Небольшое преимущество способа хранения с использованием префиксного дерева объясняется существенной экономией потребляемой памяти из-за большого количества словоформ и других слов с одинаковыми префиксами.

Для сравнения быстродействия был выбран один из текстов ранее обработанного набора данных с большим количеством пиксельного шума. Для всех слов этого текста поиск по словарю занял 1136,788 секунд при тривиальном проходе по всем словам и нахождении функции Левенштейна для каждого из них независимо. При использовании предложенного алгоритма, который позволяет осуществлять поиск функции Левенштейна параллельно сразу для нескольких слов словаря с одинаковым префиксом, время работы существенно ниже – 415,445 секунд.

Несложно объяснить такое преимущество времени обработки, если еще раз обратить внимание на асимптотические оценки алгоритмов. Тривиальный подход имеет сложность  $O(L_T L_A)$ , где  $L_T$  – суммарная длина всех слов в словаре, а  $L_A$  – средняя длина слова. При подходе с использованием префиксного дерева асимптотическая сложность алгоритма –  $O(V L_A)$ , где  $V$  – количество вершин в префиксном дереве. Очевидно, зависимость отношения количества времени в первом случае к количеству времени во втором будет оцениваться примерно, как отношение  $L_T$  к  $V$ . И действительно, для проведенного эксперимента количество вершин в полученном префиксном дереве равно 502302, суммарная длина всех слов равна 1354918. Отношение  $L_T$  к  $V$  примерно равно 2,7. Это соответствует экспериментально полученным данным.

#### Заключение

1. Апробированы два метода предобработки изображений – вейвлет- и курвлет-преобразования для удаления пиксельного шума с отсканированных изображений.
2. Установлено, что наиболее подходящим алгоритмом для удаления пиксельного шума с от-

- сканированных изображений является курвлет-преобразование.
- Предложен оригинальный метод словарного поиска с использованием префиксного дерева и динамического программирования.
  - Экспериментально установлено, что хранение словаря с использованием префиксного дерева позволяет улучшить быстродействие, что подтверждено асимптотическими оценками.
  - В дальнейшем планируется применение предложенных методов в системе оптического распознавания текстов. При этом предполагается использовать не только пороговые преобразования, но и морфологические для предобработки изображений и удаления пиксельного шума.
- Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-08-00296а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J. Wavelets and their applications. – London: ISTE, 2007. – 352 p.
- Gnanadurai D., Sadasivam V. An efficient adaptive thresholding technique for wavelet based image denoising // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2006. – V. 1 (2). – P. 114–119.
- Donoho D.L., Duncan M.R. Digital curvelet transform: strategy, implementation and experiments // Proc. Aerosense2000, Wavelet Applications VII, SPIE. – Stanford, California, 2000. – V. 4056. – P. 12–29.
- Donoho D.L. De-noising by soft thresholding // IEEE Transaction on Information Theory. – Stanford, California: IEEE, 1995. – V. 41. – P. 613–627.
- Candès E.J. Ridgelets: theory and applications: Ph.D. Thesis. – Stanford, 1998. – 13 p.
- Starck J., Candès E.J., Donoho D.L., The curvelet transform for image denoising // IEEE transactions on image processing. – 2002. – V. 11. – № 6. – P. 61–66.
- Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2000. – 224 с.
- Левенштейн В.И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов // Доклады Академии Наук СССР. – М.: Проспект, 2009. – С. 56–59.
- Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2011. – 1293 с.

*Поступила 03.09.2013 г.*

UDC 004.352.242

## IMPROVING THE QUALITY OF OPTICAL CHARACTER RECOGNITION METHOD BY JOINT APPLICATION OF WAVELET-AND CURVELET-TRANSFORMS AND VOCABULARY SEARCH ALGORITHM

D.S. Grigoryev, P.A. Khaustov, V.G. Spitsyn

Tomsk Polytechnic University

*Optical character recognition is a complex problem, which has no definite solution. There are a lot of approaches and methods to solve this problem. The proposed approach, based on aggregate usage of wavelet-transformation for reducing the feature space and probabilistic neural network for classification, has shown a good quality of recognition. However the proposed approach can be improved with preprocessing and postprocessing algorithms. The algorithm of preprocessing based on adaptive thresholding for curvelet and wavelet transformations is proposed. The numerical experiments are held to determine the most efficient algorithm of preprocessing. The approach based on vocabulary search and dynamic programming is proposed for postprocessing.*

**Key words:**

*Thresholding, wavelet-transform, curvelet-transform, dynamic programming, trie-tree, vocabulary search.*

## REFERENCES

- Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J. Wavelets and their applications. London, ISTE, 2007. 352 p.
- Gnanadurai D., Sadasivam V. An efficient adaptive thresholding technique for wavelet based image denoising. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2006, vol. 1 (2), pp. 114–119.
- Donoho D.L., Duncan M.R. Digital curvelet transform: strategy, implementation and experiments. *Proc. Aerosense2000, Wavelet Applications VII, SPIE*. Stanford, California, 2000, vol. 4056, pp. 12–29.
- Donoho D.L. De-noising by soft thresholding. *IEEE Transaction on Information Theory*. Stanford, California, IEEE, 1995, vol. 41, pp. 613–627.
- Candès E.J. *Ridgelets: theory and applications*. Ph.D. thesis. Stanford, 1998. 13 p.
- Starck J., Candès E.J., Donoho D.L. The curvelet transform for image denoising. *IEEE transactions on image processing*, 2002, vol. 11, no. 6, pp. 61–66.
- Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Yu. *Nechetkaya logika i iskusstvennyye neyronnyye seti* [Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2000. 224 p.
- Levenshteyn V.I. Dvoichnye kody s ispravleniem vypadeniy, vstavok i zameshcheniy simvolov [Binary codes with corrections of removed, inserted and replaced characters]. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Reports of USSR scientific academy]. Moscow, Prospekt Publ., 2009. pp. 56–59.
- Kormen T., Leyzerson Ch., Rivest R., Shtayn K. *Algoritmy: postroenie i analiz* [Introduction to Algorithms]. Moscow, Williams Publ., 2011. 1293 p.

УДК 004.822

**ОНТОЛОГИЯ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ»**

В.З. Ямпольский, И.А. Заикин

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

*Для целостного представления об относительно сложном объекте, новом и потому ещё не устоявшемся понятии «интеллектуальное месторождение», а также для выявления состава основных компонент и отношений между ними имеет смысл построить онтологию этого понятия. В статье предложена онтология объекта «интеллектуальное месторождение» на основе его декомпозиции по составу объектов разработки, геологических свойств месторождения, основных направлений мониторинга, составу моделей разработки и программных систем, поставляемых ведущими мировыми производителями. Показаны фрагменты записи онтологии на языке OWL 2 с использованием Манчестерского синтаксиса. Приведён пример использования онтологии в системе поддержки принятия решений. Предложенная онтология может применяться при реализации проектов, связанных с описанием и разработкой «интеллектуального месторождения» и мониторингом реализуемых технологических процессов.*

**Ключевые слова:**

*Онтология, OWL 2, интеллектуальное месторождение, геологические свойства, геологическая модель.*

**Введение**

Для целостного представления об относительно сложном объекте, новом и потому ещё не устоявшемся понятии «интеллектуальное месторождение», а также для выявления состава основных компонент, связей и отношений между ними, имеет смысл построить онтологию (онтологическую модель) этого понятия [1].

Чаще всего онтология некоторого сложного понятия (объекта) представляет собой иерархическую структуру, для построения которой последовательно применяется метод декомпозиции, когда объект или понятие  $i$ -го уровня разбивается на составные части, элементы (компоненты) уровня  $i+1$ , и так далее.

Для такого рода разбиений (декомпозиции) необходимы некоторые основания. Если эти основания носят объективный характер, то полученная с их помощью декомпозиция именуется системной, в противном случае – эвристической.

Источником оснований декомпозиции могут служить простейшие модели систем: модель чёрного ящика (состав входов и выходов), модель состава исследуемого объекта или системы, модель этапов жизненного цикла деятельности и др. Применительно к анализируемому понятию (системе) «интеллектуальное месторождение» в качестве оснований декомпозиции предпочтительным является применение моделей состава исследуемого объекта, состава его свойств, перечня моделей, программных комплексов и др.

**Построение онтологии**

Приведём перечень оснований декомпозиции исследуемого объекта для построения онтологии «Интеллектуальное месторождение».

Если в качестве оснований декомпозиции принять состав типовых компонент разрабатываемого геологического объекта, то объектами описания будут: месторождение, участок (часть месторождения), куст скважин, скважина.

Соответственно, в онтологии может иметь место: интеллектуальное месторождение, интеллектуальный участок месторождения, интеллектуальный куст скважин, интеллектуальная скважина.

Важнейшей функцией системы управления интеллектуальным месторождением является мониторинг процесса разработки. Цель мониторинга – контроль изменения основных свойств месторождения и отдельных его участков в процессе разработки. К числу основных контролируемых геологических свойств месторождения и его компонент относятся [2]: напряжённость пласта, пьезопроводность, гидропроводность, проницаемость, нефтенасыщенность, водонасыщенность.

Заметим, что мониторингу, как важнейшей функции наблюдения за ходом разработки нефтегазовых месторождений и её контроля, могут быть подвержены не только вышеперечисленные геологические свойства месторождений, но и используемое нефтепромысловое оборудование. В таком случае в интеллектуальном месторождении может иметь место декомпозиция функции мониторинга по оборудованию: месторождения, промысла (участка), куста скважин, скважины (электроцентробежные насосы, штанговые глубинные насосы и др.)

Существенно различаются задачи моделирования нефтегазовых месторождений и их частей в зависимости от целей исследований и контроля. Наиболее распространёнными целями и направлениями являются: петрофизическое, геологическое, геофизическое и гидродинамическое моделирование.

В эффективном управлении разработкой нефтегазовых месторождений особое место принадлежит ПДГТМ – постоянно действующим геолого-технологическим моделям, разрабатываемым проектно-технологическими институтами нефтегазовой отрасли и постоянно адаптируемым в процессе разработки по отношению к реальному состоянию разработки месторождения. Как правило, это ци-



Рис. 1. Структура онтологии «Интеллектуальное месторождение»

фровые 3D-модели, опирающиеся на актуальную комплексную базу данных месторождения. С учётом изложенного, основными компонентами обеспечения функционирования ПДГТМ являются: комплексная база данных «Месторождение», трёхмерные геологические модели, трёхмерные гидродинамические модели.

Известно, что подавляющее большинство современных исследований геологических объектов на всех этапах жизненного цикла месторождения осуществляется с помощью информационных и компьютерных технологий. Основу базового программного обеспечения для перечисленных выше направлений контроля параметров, моделирования, анализа и оптимизации процесса разработки нефтегазовых месторождений составляют следующие программные комплексы: ECLIPSE, Petrel, GP-Storage, MapInfo Professional, Landmark, Tempest.

Применительно к системе «Интеллектуальное месторождение» (ИМ) особое значение приобретают комплексные модели. К ним можно отнести: систему мониторинга ИМ, систему управления данными ИМ, систему планирования и оценки эффективности геолого-технических мероприятий (ГТМ), систему адаптивного управления ИМ.

Состав перечисленных выше объектов разработки, геологических свойств месторождения, основных направлений мониторинга, моделей разработки и программных систем, поставляемых веду-

щими мировыми вендорами для анализа, управления и оптимизации разработки нефтегазовых месторождений, и составляет основу онтологии интеллектуального месторождения, структура которой приведена на рис. 1, где также использованы следующие обозначения: УПСВ – установка предварительного сброса воды; ДНС – дожимная насосная станция; БКНС – блочно-компрессорная насосная станция.

Рассмотрим подробнее объекты мониторинга. Под объектом мониторинга в данной онтологии понимается месторождение, пласт, скважина или куст скважин (рис. 2).

Месторождения делятся по типу добываемого углеводородного сырья на нефтяные, нефтегазовые и газовые (рис. 3).

Ниже приведён фрагмент записи онтологии на языке OWL 2 в Манчестерском синтаксисе [3], описывающий иерархию, показанную на рис. 3.

```
Class: Field
Annotations:
  label «Месторождение»@ru,
  label «Field»@en
Class: GasField
Annotations:
  label «Месторождение природного газа»@ru,
  comment «Совокупность залежей природного газа и газоконденсата на определённой территории.»@ru
SubClassOf: Field
```



Рис. 2. Виды объектов мониторинга

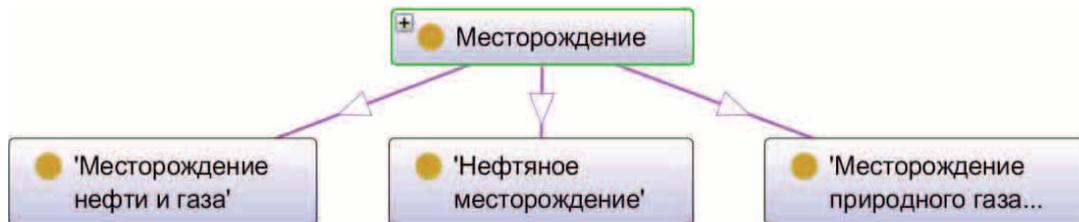


Рис. 3. Фрагмент классификации месторождений

DisjointWith: OilField, OilAndGasField  
 Class: OilField  
 Annotations:  
 comment «Совокупность залежей нефти на определённой территории.»@ru,  
 label «Нефтяное месторождение»@ru  
 SubClassOf: Field

DisjointWith: GasField, OilAndGasField  
 Class: OilAndGasField  
 Annotations:  
 comment «Скопление углеводородов (нефти, газа и газоконденсата) в одной или нескольких залежах, связанных территориально, общностью геологического строения и нефтегазоносности.»@ru,  
 label «Месторождение нефти и газа»@ru  
 SubClassOf: Field

DisjointWith: OilField, GasField  
 Составной частью нефтяного промысла является скважина. Скважина – цилиндрическая горная выработка пространственной ориентации, диаметр которой существенно меньше её длины, предназначенная для обеспечения сообщения продуктивного горизонта с земной поверхностью. По своему назначению скважины подразделяются на несколько видов, из которых основными являются [4]: разведочные; добывающие (нефть, газ, вода); нагнетательные (вода, газ, пар, воздух и т. д.); контрольные (пьезометрические); оценочные. Добывающие и нагнетательные скважины составляют так называемый эксплуатационный фонд или эксплуатационные скважины. На рис. 4 показана иерархия скважин.

Ниже приведён фрагмент записи онтологии на языке OWL в Манчестерском синтаксисе, описывающий иерархию, показанную на рис. 4.

```
Class: Well
Annotations:
  rdfs: label «Скважина»@ru,
  rdfs: label «Well»@en
```

```
Class: ExploratoryWell
Annotations:
  rdfs: label «Pioneer well»@en,
  rdfs: label «Разведочная скважина»@ru,
  rdfs: label «Exploratory well»@en
SubClassOf:
  Well
```

```
Class: ProductionWell
Annotations:
  rdfs: label «Эксплуатационная скважина»@ru,
  rdfs: label «Production well»@en,
  rdfs: label «Field well»@en
SubClassOf:
  Well
```

```
Class: ProducerWell
Annotations:
  rdfs: label «Producer well»@en,
  rdfs: label «Добывающая скважина»@ru
SubClassOf:
  ProductionWell
```

```
Class: PressureWell
Annotations:
  rdfs: label «Нагнетательная скважина»@ru,
  rdfs: label «Input well»@en,
  rdfs: label «Pressure well»@en,
  rdfs: label «Intake well»@en
SubClassOf:
  ProductionWell
```

```
Class: DevelopmentTestWell
Annotations:
  rdfs: label «Development test well»@en,
  rdfs: label «Оценочная скважина»@ru
SubClassOf:
  Well
```

```
Class: ObservationWell
Annotations:
  rdfs: label «Pressure-observation well»@en,
  rdfs: label «Контрольная скважина»@ru,
  rdfs: label «Piestic well»@en,
  rdfs: label «Observation well»@en,
```

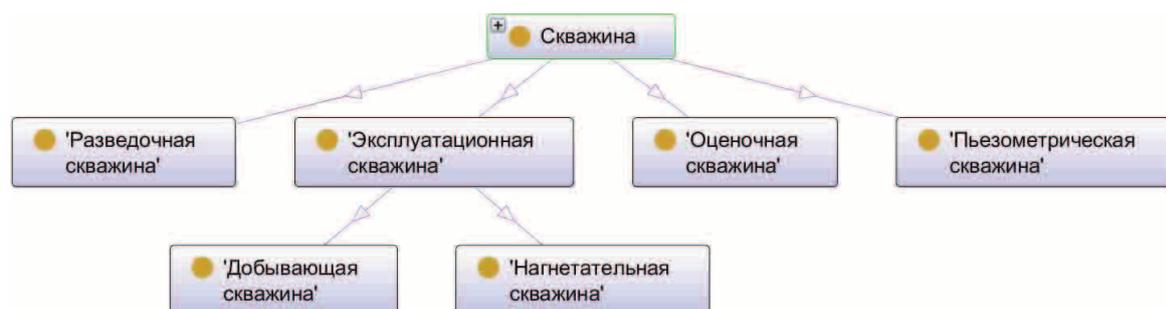


Рис. 4. Виды скважин

```

rdfs: label «Пьезометрическая скважина»@ru,
rdfs: label «Monitor well»@en
SubClassOf:
Well

```

На практике скважины чаще всего объединяются в кусты. В онтологии это записывается с помощью транзитивного свойства `isPartOf`. Принадлежность скважины или куста к месторождению

Таблица. Свойства пластов и насыщающих флюидов

Название свойства	Описание
intensity	Напряжённость
permeability	Проницаемость
piezoconductivity	Пьезопроводность
porosity	Пористость
sulphur_content_in_oil	Содержание серы в нефти (сернистость)
water_saturation	Водонасыщенность
WOC_datum	Абсолютная отметка ВНК
alkanes_content_in_oil	Содержание парафина в нефти
gas_content_in_oil	Газосодержание нефти
grittiness_factor	Коэффициент песчаности
initial_oil_reserves	Начальные балансовые запасы нефти
initial_recoverable_oil_reserves	Начальные извлекаемые запасы нефти
initial_reservoir_pressure	Начальное пластовое давление
initial_reservoir_temperature	Начальная пластовая температура
mean_depth	Средняя общая толщина
mean_depth_of_burial	Средняя глубина залегания
mean_oil_saturated_depth	Средняя нефтенасыщенная толщина
mean_productivity	Средняя продуктивность
initial_recoverable_oil_reserves	Начальные извлекаемые запасы нефти
mean_water_saturated_depth	Средняя водонасыщенная толщина
mean_oil_saturation_POZ	Средняя нефтенасыщенность ЧНЗ
mean_oil_saturation_WOZ	Средняя нефтенасыщенность ВНЗ
oil_and_gas_area	Площадь нефтегазоносности
oil_density_in-situ	Плотность нефти в пластовых условиях
oil_density_in_the_surface	Плотность нефти в поверхностных условиях
oil_recovery_factor	Коэффициент нефтеизвлечения
oil_viscosity_in-situ	Вязкость нефти в пластовых условиях
oil_volume_factor	Объёмный коэффициент нефти
permeability	Проницаемость
initial_recoverable_oil_reserves	Начальные извлекаемые запасы нефти
pressure_of_oil_saturation_with_gas	Давление насыщения нефти газом
ruggedness_factor	Коэффициент расчленённости
stratum_outer_radius	Радиус влияния скважины
stratum_pressure_WOC	Давление на уровне ВНК
water_compressibility	Сжимаемость воды
water_density_in-situ	Плотность воды в пластовых условиях
water_viscosity_in-situ	Вязкость воды в пластовых условиях

фиксируется с помощью того же свойства `isPartOf`:  
`ObjectProperty: isPartOf`

`Annotations:`

`label «является частью»@ru`

`Characteristics: Irreflexive, Transitive`

`InverseOf: contains`

В онтологию включаются также сведения о видах пластов (рис. 5): нефтяной, водоносный и газовый пласт.



Рис. 5. Виды пластов

В таблице приведён перечень основных свойств пластов и насыщающих их флюидов на примере нефтяной залежи.

Поскольку одним из предназначений онтологии является её использование в системе поддержки принятия решений, в ней моделируются также некоторые проблемные ситуации и условия их наступления. В частности, класс «Ситуация» может быть описан следующими экземплярами: неэффективная закачка; низкий коэффициент охвата; низкое пластовое давление; отрицательная динамика пластового давления; падение пластового давления в зонах ГТМ на добывающем фонде сква-

жин. Каждая ситуация связана с месторождением через свойство `holdsAt` и с условиями её наступления. Эта связь записывается с помощью языка продукционных правил. Пример такой записи:

`Field (? f),`

`holdsAt (Low_watering, ? f),`

`holdsAt (Mean_formation_pressure_is_less_than_target_one, ? f),`

...

`-> holdsAt (Low_formation_pressure, ? f)`

В данном правиле показаны условия «Низкая обводнённость продукции» и «Среднее пластовое давление ниже целевого».

### Заключение

Разработана базовая онтология, описывающая основные компоненты «интеллектуального» месторождения и отношения между ними, дающая в совокупности целостное представление о понятии «интеллектуальное месторождение». Предложенная онтология может применяться при реализации проектов, связанных с описанием и разработкой «интеллектуального» месторождения и мониторингом реализуемых технологических процессов.

*Разработка проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках финансирования работ по Государственному контракту 14.515.11.0047.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Захарова А.А., Ямпольский В.З. 3D-моделирование нефтегазовых месторождений. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. – 224 с.
3. Horridge M., Patel-Schneider P.F. OWL 2 Web Ontology Language Manchester Syntax (Second Edition) // World Wide Web Con-

sortium. 2012. URL: <http://www.w3.org/TR/owl2-manchester-syntax/> (дата обращения: 01.09.2013).

4. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. – М: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2003. – 816 с.

Поступила 04.09.2013 г.

UDC 004.822

## THE «SMART FIELD» ONTOLOGY

V.Z. Yampolskiy, I.A. Zaikin

Tomsk Polytechnic University

*In order to get a holistic view of a relatively complex object, a new and thus not yet well-established concept of «smart field», as well as to identify the main components and relations between them it makes sense to create the ontology of this concept. The paper proposes the ontology of a «smart field» object based on its decomposition by mining objects, field geological properties, main monitoring areas, composition of mining models, and software systems supplied by leading international vendors. The authors show some fragments of the ontology in OWL 2 language using Manchester syntax. The paper introduces the example of using the ontology in a decision support system. The proposed ontology can be used in implementing projects related to description and development of «smart fields» and to workflow monitoring.*

### Key words:

*Ontology, OWL 2, smart field, geological properties, geological model.*

## REFERENCES

1. Tuzovskiy A.F., Chirikov S.V., Yampolskiy V.Z. *Sistemy upravleniya znaniyami (metody i tekhnologii)* [Knowledge management systems]. Tomsk, NTL Publ., 2005. 260 p.
2. Zakharova A.A., Yampolskiy V.Z. *3D-modelirovanie neftegazovykh mestorozhdeniy* [3D-modelling of oil and gas fields]. Tomsk, NTL Publ., 2010. 224 p.
3. Horridge M., Patel-Schneider P.F. *OWL 2 Web Ontology Language Manchester Syntax* (Second Edition), 2012. Available at: <http://www.w3.org/TR/owl2-manchester-syntax/> (accessed 01 September 2013).
4. Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefti* [Well oil production]. Moscow, Oil and gas Publ. of Russian state university of oil and gas, 2003. 816 p.

УДК 681.3:004.5:004.75

## ОРГАНИЗАЦИЯ УДАЛЁННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСТАНОВКЕ ТИПА ТОКАМАК

А.А. Мезенцев, В.М. Павлов, Ю.Н. Голобоков, Д.А. Евстифеев

Томский политехнический университет  
E-mail: mezentsev.anton@gmail.com

Описан программный механизм организации удалённого участия в экспериментах на исследовательской установке типа Токамак в части организации удалённого управления оборудованием, контроля его параметров состояния и диагностики. Он является альтернативой традиционно применяемому механизму для российских и зарубежных установок типа Токамак: T-10, T-15, JET, JT-60, FTU и др., основанным на таких программных комплексах, как MDS+ и ПК ИВК. Поскольку традиционные механизмы устарели и не могут применяться на новых установках типа Токамак без глубокой модернизации, задача новой разработки является актуальной. Механизм основан на применении нового унифицированного протокола взаимодействия подсистем системы автоматизации экспериментов установок типа Токамак – T-ICS. Протокол учитывает индивидуальные особенности аппаратной платформы подсистем и обеспечивает шифрование сообщений, необходимое при удалённом взаимодействии компонентов системы посредством сети Ethernet. Показаны его преимущества по сравнению с традиционными подходами, применяемыми при решении подобных задач. Реализация предложенного механизма показана на примере использования SCADA системы TRACE MODE для управления оборудованием системы автоматизации экспериментов на одной из зарубежных установок типа Токамак. Применение нового механизма совместно со SCADA позволяет значительно автоматизировать процесс разработки прикладного ПО, упрощает командный язык управления оборудованием и диагностики его состояния. В настоящее время механизм прошёл тестирование на базе макетов подсистем действующего зарубежного Токамака и полноценно применяется в составе системы управления им. Ввиду высокой перспективности разработки ведутся работы по внедрению механизма в состав системы управления модернизируемого российского Токамака T-15.

**Ключевые слова:**

Удалённое участие, система автоматизированного управления, САПР, TRACE MODE, протокол T-ICS.

**Введение**

Экспериментальные физические установки, работающие в импульсно-периодическом режиме, например, такие как Токамак, функционируют под управлением распределённых многоуровневых систем управления. В процессе проведения экспериментов на Токамаках принимает участие значительное количество инженеров и учёных, в том числе территориально располагающихся в других научных центрах вне экспериментального комплекса. В этой связи обеспечение инфраструктуры удалённого участия в экспериментах на физических установках – это направление в технике, которое в настоящее время активно развивается. Использование систем удалённого участия в процессе управления экспериментальными комплексами, на различных этапах подготовки и проведения эксперимента, описано во многих публикациях для установок DIII-D [1], LHD [2], TJ-II [3], JT-60 [4], RFX [5], JET [6] и др.

Применение механизмов удалённого участия в эксперименте дает положительный эффект при использовании в следующих областях: управление

экспериментальными данными [1–6]; управление математическими расчётами [1, 4]; управление параметрами настройки ЭВМ, диагностического и иного оборудования [3, 4, 6, 7]; управление параметрами эксперимента (в том числе в части работы подсистем) [1–3, 6]; телеконференцсвязи [1, 2, 4, 6, 7]. Для реализации этих механизмов применяются как встроенные средства из состава интегрированной программной среды управления экспериментальной установкой (например, JScope, ReviewPlus, EfitViewer), так и инструменты подключения к источнику данных (например, DAS MEX, XAccess, DAQ Access) [8–10]. Исследования [9, 10] показывают, что для организации удалённого участия в эксперименте на Токамаках широко применяются: сетевые интерфейсы, специализированные средства подключения к СУБД (библиотеки XAccess, DASAccess), различные Java- и WEB-клиенты [11] (например, DASWeb). В данной работе будут рассмотрены альтернативные механизмы организации удалённого управления оборудованием в режиме подготовки и проведения физического эксперимента.

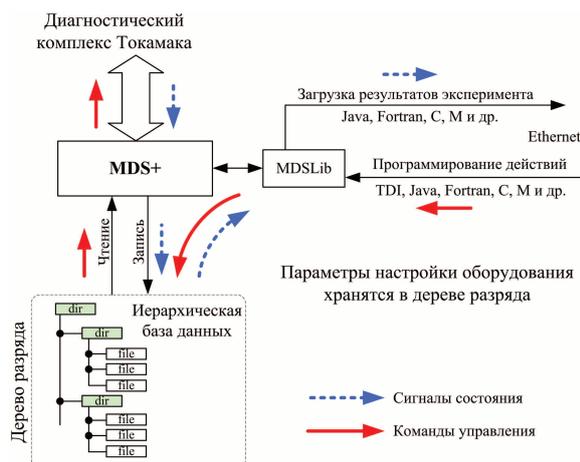


Рис. 1. Схема управления оборудованием при помощи программного комплекса MDS+

Традиционно в составе систем управления экспериментальными комплексами, для разработки программного обеспечения систем автоматизации научных исследований, применяется инструментальный программный комплекс MDS+ [5, 12, 13]. Он используется на установках: Alcator C-Mod, JET, FTU, DIII-D и на десятке других. Также рассматривалась возможность его применения на российских Токамаках T-10 и T-15 [12]. Система управления физическим экспериментом, построенная на основе комплекса MDS+ (рис. 1), предполагает наличие так называемого «дерева разряда» (группы файлов, организованных в виде иерархической базы данных). В режиме подготовки к эксперименту в состав «дерева разряда» записываются параметры настройки оборудования, алгоритмы запуска и останова измерительной аппаратуры, маршрут сохранения результатов, а также другая информация, составляющая описание эксперимента (метаданные). Конфигурация дерева разряда описывается при помощи специализированного текстового языка программирования TCL, он же применяется для программирования операций в системе управления, и языка программирования TDI, используемого для редактирования элементов дерева [12]. Для реализации удалённого доступа к данным и управления экспериментом разработчики программного комплекса предлагают использовать библиотеку MDSLlib, обеспечивающую интерфейс между MDS+ и программами, создаваемым пользователями на языках программирования: C, Fortran, Java, M, G, IDL.

Следует заметить, что описанный механизм фактически предполагает реализацию режима программного управления посредством файлового обмена между клиентами (диагностической аппаратурой экспериментального комплекса) и сервером системы автоматизации экспериментов (САЭ), базирующимся на программном комплексе MDS+. В настоящее время такой подход считается устаревшим, поскольку сетевые технологии получили широкое развитие.

Стоит также обратить внимание и на современный комплекс программ сбора, хранения и математической обработки данных, разработанный для измерительно-вычислительного комплекса Института ядерного синтеза Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [14, 15] (далее ПК ИВК). Преимущества ПК ИВК, по отношению к MDS+, определяются улучшенной моделью структурной организации результатов экспериментов, хранимых в реляционной базе данных, усовершенствованным механизмом подключения к ней, наличием экспериментальной информации нескольких отечественных и зарубежных установок, а также встроенными средствами ее поиска и обработки. В работах [9, 10] показана практическая возможность применения этого программного обеспечения в качестве альтернативы MDS+ при организации удалённого доступа к данным эксперимента, но не упоминается о возможности его использования при управлении экспериментальным оборудованием. Фактически ПК ИВК позиционируется как инструмент структурной организации данных, полученных из различных источников, в том числе из MDS+. Кроме этого, программы из состава ПК ИВК предоставляют пользователю усовершенствованный интерфейс доступа к информационным массивам и средства их обработки после эксперимента.

Несмотря на наличие проверенного временем программного обеспечения, требуется дальнейшее развитие концепции удаленного управления. Современные системы автоматизации эксперимента претерпели существенные изменения. Устройства на базе высокопроизводительных процессоров цифровой обработки сигналов, программируемых логических интегральных схем и других управляемых компонентов аналоговой и цифровой электроники дают возможность разрабатывать и применять в составе систем автоматизации аппаратно-программные комплексы, превосходящие по своим техническим характеристикам существующие. В соответствии с этим появляется необходимость организации удаленного управления экспериментом с доступом не только до уровня сервера системы, но и до каждой подсистемы сбора данных и управления. При этом механизм организации удаленного участия в эксперименте должен быть независимым от большого количества индивидуальных параметров устройств, таких как физический интерфейс подключения к сети, общий алгоритм работы, структура внутреннего адресного пространства, формат представления данных и др.

#### Механизм удалённого проведения физического эксперимента

Указанная цель достигается за счет создания слоя программного обеспечения, описывающего уровень аппаратной абстракции подсистемы управления. За счет этого большая часть программного

обеспечения подсистем диагностики и управления может быть унифицирована. Все внешние взаимодействия подсистем выполняются путем использования унифицированного командного языка, предоставляющего средства для описания диаграммы состояний (рис. 2), в которых могут находиться элементы системы автоматизации эксперимента, а также действий, которые необходимо выполнить для перехода в то или иное состояние. Кроме того, в языке есть средства для указания последовательности переходов между состояниями, а также реализована поддержка ветвлений при выполнении команд, в зависимости от результата их выполнения. Полученная диаграмма эксперимента интерпретируется программой управления экспериментом, которая связывается со всеми подсистемами, участвующими в эксперименте при помощи сети Ethernet, либо последовательным линиям связи. При этом использование какого-то одного из известных протоколов сетевого взаимодействия для решения задач передачи экспериментальных данных, обеспечения контроля состояния подсистем САЭ, передачи команд управления, событийной синхронизации подсистем, передачи сигналов системы аварийной защиты невозможно. Поэтому в рамках проекта САЭ Токамака авторами разработан собственный протокол – T-ICS [9, 16], являющийся базовым элементом системы. Протокол учитывает индивидуальные особенности аппаратной платформы подсистем, обеспечивает шифрование для безопасного удаленного доступа и обратную передачу инициативных сигналов от подсистем. Протокол реализует модель взаимодействия с устройствами путем организации виртуального адресного пространства, где возможно считывание или запись переменных различных типов. Кроме того, устройства могут обмениваться командами и сообщениями. В качестве механизмов оптимизации работы с данным протоколом можно упомянуть подписку на данные, группировку запросов

разных типов в один пакет, отложенный ответ на запрос. Протокол работает через последовательные линии связи и в среде передачи Ethernet поверх UDP. Поддерживается связь устройств с разными порядками байт.

В рамках системы автоматизации физического эксперимента на установке типа Токамак новый протокол позволяет специальной ЭВМ управления разрядом (рис. 3) формировать команды управления оборудованием в соответствии со сценарием эксперимента или алгоритмом [16], заданным оператором на удаленной ПЭВМ.

Унифицированные команды позволяют перевести диагностическую систему в одно из следующих состояний (рис. 2): «инициализация», «готовность», «старт», «стоп», «экспорт экспериментальных данных», «сброс параметров, перезагрузка», «выключен». Контроль процесса выполнения команд оборудованием САЭ и контроль текущего состояния также выполняется по протоколу T-ICS в обратном направлении. Унифицированные команды управления позволяют оператору Токамака работать с оборудованием аналогично ЭВМ управления разрядом без составления сценария разряда, контролируя состояние оборудования по ответным сигналам.

Представленная на рис. 3 схема показывает структуру САЭ установки типа Токамак. В отличие от программного комплекса, построенного на основе MDS+, в составе использованной нами схемы применяется современная СУБД PostgreSQL и реляционная база данных, в которой организовано хранение «дерева разряда».

Алгоритм управления оборудованием формируется на одной или нескольких удаленных ПЭВМ в составе пультов оператора и обрабатывается ЭВМ управления экспериментом. Состояние оборудования и текущий этап эксперимента возвращаются в виде метаданных в дерево разряда и оператору, который сформировал команду управления.

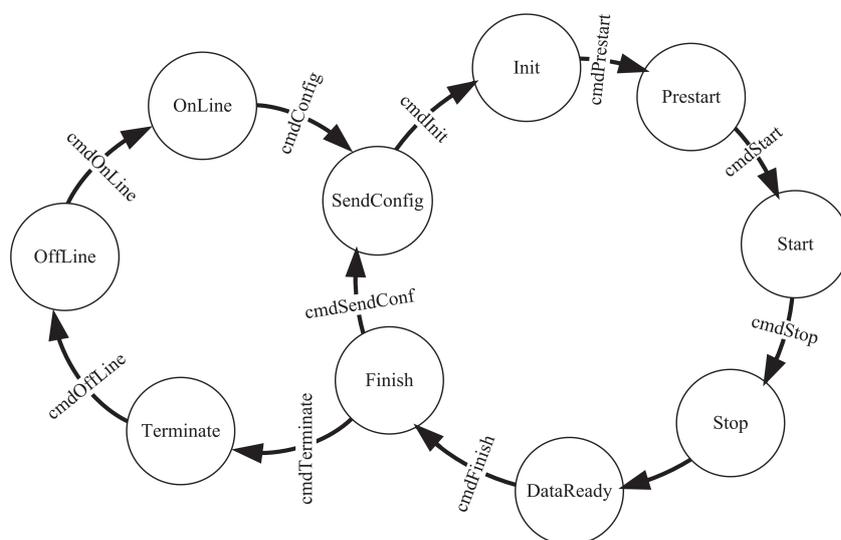


Рис. 2. Диаграмма состояний оборудования диагностического комплекса

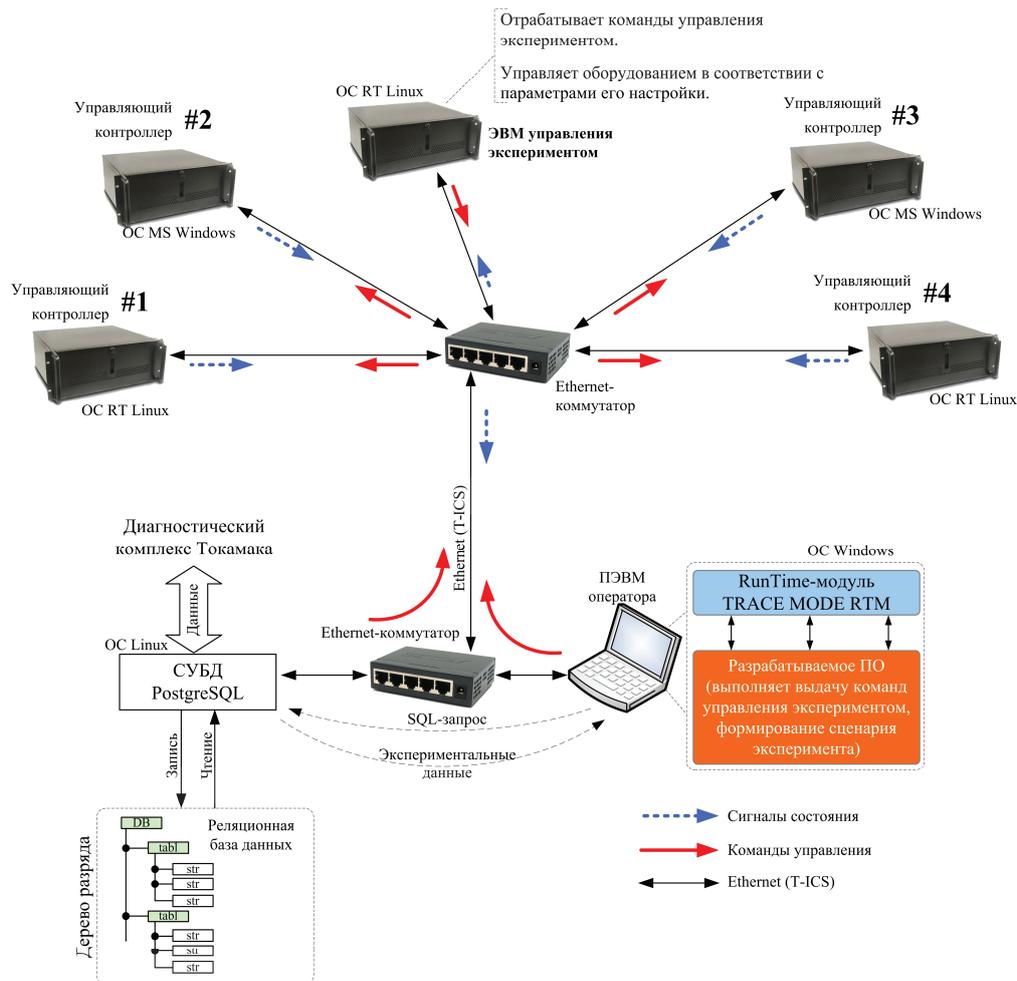


Рис. 3. Структура САЭ установки типа Токамак, в которой реализован механизм удалённого управления оборудованием при помощи TRACE MODE

Для программирования алгоритмов внешнего управления оборудованием экспериментального комплекса нами используется программный комплекс TRACE MODE. Данный компонент САЭ позволяет значительно сократить время разработки программного обеспечения САЭ, упрощает процедуру настройки сетевого взаимодействия между контроллерами подсистем и реализацию алгоритмов управления оборудованием. Они могут создаваться при помощи графических языков программирования: SFC, FBD и др. языками стандарта IEC 61131-3. Для работы с протоколом T-ICS и выполнения унифицированных команд управления (рис. 3) нами разработан и применяется специальный драйвер, который со стороны прикладного ПО, созданного в TRACE MODE, распознаётся как плата УСО, а со стороны диагностического комплекса – как унифицированный источник команд управления.

Благодаря применению комплекса инструментальных программ TRACE MODE упрощается и механизм разработки интерфейса оператора за счёт использования развитой библиотеки встроенных сложных графических форм. Применение

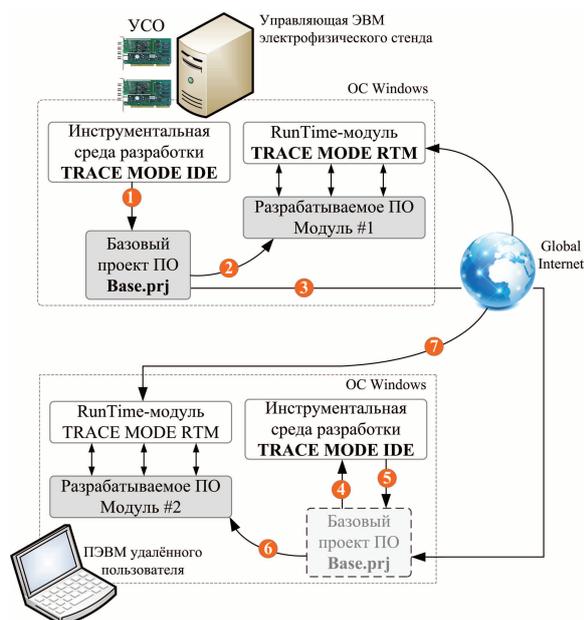
СУБД даёт преимущество в организации хранения информационных массивов и облегчает поиск результатов в базе данных эксперимента. В составе реляционной базы данных допускается хранение дополнительных метаданных эксперимента в виде текстовых описаний, электронных документов, видеофайлов или графических изображений со схемами постановки эксперимента. Применение унифицированного сетевого протокола T-ICS в САЭ также допускает использование механизма в режиме отладки и тестирования параметров подсистем на макетах элементов САЭ.

#### Удалённое участие в процессе отладки и тестирования элементов САЭ на макетах элементов системы

При разработке и отладке подсистем электрофизических комплексов во многих проектных и научных организациях параллельно проводится макетирование их основных узлов. Например, в ТПУ разработаны и эксплуатируются макеты: системы синхронизации и противоаварийной защиты Токамака, системы многоканальной диагностики плазменных процессов, системы многосвязного

цифрового управления плазменными процессами Токамака, макет источника питания обмотки электромагнитной системы Токамака, макет информационно-измерительной системы Токамака, макет центрального пульта управления Токамаком и др. Подобные макеты можно использовать для удалённой проверки параметров настройки оборудования, отладки алгоритмов управления во время пуско-наладки или ремонта оборудования действующей установки, а также для подготовки персонала. Полнофункциональные макеты могут использоваться независимыми организациями для проведения локальных экспериментов, проверки результатов моделирования или научных расчётов.

Использование программного комплекса MDS+ при разработке программного обеспечения для удалённого управления макетами затруднительно, поскольку предполагает дополнительный объём программирования со стороны клиента (экспериментатора) и согласования параметров подключения со стороны сервера (системы управления макетом подсистемы электрофизического комплекса), согласования процессов передачи данных между MDS+, программами математической обработки данных, программами организующими интерфейс пользователя.



**Рис. 4.** Принцип разработки и исполнения программного обеспечения электрофизического комплекса: 1 – разработка проекта базового программного модуля; 2 – трансляция части проекта в коды, предназначенные для исполнения RTM; 3 – загрузка базового программного модуля на машину удалённого клиента; 4, 5 – программирование алгоритмов обработки данных и управления целевым объектом; 6 – трансляция части проекта в коды, предназначенные для исполнения RTM удалённого клиента; 7 – сетевое взаимодействие между электрофизическим комплексом и удалённым клиентом

При использовании компонента САПР (например, TRACE MODE) процесс разработки программного клиента значительно упрощается за счёт автоматизации процесса настройки сетевых подключений, процесса разработки алгоритмов управления оборудованием на интуитивно понятных графических языках программирования и применения специальных инструментов проектирования элементов интерфейса пользователя. В этом случае (рис. 4) часть программного обеспечения сервера (системы управления макетом подсистемы) разрабатывается эксплуатирующей организацией и предоставляет клиенту сетевые точки подключения к системе для управления оборудованием. Клиент самостоятельно реализует алгоритмы управления оборудованием в соответствии со своими потребностями и ожиданиями при программировании пользовательской части программного обеспечения.

Сетевая безопасность предложенного механизма обеспечивается посредством применения стандартных программ защиты (антивирус и Firewall, фильтрация по MAC и IP), а также посредством предоставления базового программного модуля только сертифицированным клиентам.

#### Заключение

Представленный в работе подход к построению САЭ установок типа Токамак основан на применении современных инструментальных программных средств для решения задачи оперативной разработки прикладного программного обеспечения, используемого в процессе удалённого управления экспериментальным оборудованием. Применение такого подхода позволяет в течение десятков минут реализовать и проверить эффективность функций и алгоритмов управления отдельными узлами электрофизической установки. При этом операции настройки процессов межкомпонентного сетевого взаимодействия значительно автоматизированы. Унификация интерфейса подключения к системе локального управления САЭ Токамака, показанная на примере сетевого протокола T-ICS, позволяет автоматизировать процесс подключения к серверу САЭ для передачи команд управления. Команды управления могут формироваться как специальной ЭВМ в составе САЭ, так и удалёнными клиентами через глобальную сеть. Разработанный нами протокол T-ICS может быть использован как на действующих, так и на вновь создаваемых установках.

Достоинством такого механизма, в случае использования его в составе парка макетов электрофизических систем Токамака, является то, что он позволяет организовать работу группы пользователей с несколькими подсистемами одного комплекса. В этом случае удалённый пользователь самостоятельно разрабатывает прикладное программное обеспечение, в соответствии со своими ожиданиями. Допускается разработка многотерминальной системы управления установкой, предназначенной для параллельной работы группы

или коллектива исследователей. При этом совместная, одновременная работа пользователей с оборудованием комплекса будет регламентирована структурой разрабатываемой части программного обеспечения и средствами контроля доступа исследователей к функциям управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McHarg B.B., Casper T.A., Davis S., Greenwood D. Tools for remote collaboration on the DIII-D national fusion facility // Fusion Engineering and Design. – 1999. – V. 43. – P. 343–355.
2. Nagayama Y., et al. Control, data acquisition, data analysis and remote participation in LHD // Fusion Engineering and Design. – 2008. – V. 83. – P. 170–175.
3. Vega J., Sanchez E., Portas A., Pereira A., Mollinedo A., et al. Overview of the TJ-II remote participation system // Fusion Engineering and Design. – 2006. – V. 81. – P. 2045–2050.
4. Oshima T., et al. Development of environment for remote participation in fusion research on JT-60 // Fusion Engineering and Design. – 2004. – V. 71. – P. 239–244.
5. Luchetta A., Manduchi G., Taliercio C. et al. MDSplus data acquisition in RFX and its integration in legacy systems // Fusion Engineering and Design. – 2003. – V. 66–68. – P. 959–963.
6. Suttrop W., Kinna D., Farthing J., Hemming O., How J., Schmidt V. Remote Participation at EFDA–JET Task Force Work, Experience and Priorities from a User’s Point of View // Preprint European Fusion Development Agreement № EFDA–JET–PR (01)19. – 2001. – 8 p.
7. Yamamoto T., Nagayama Y., Nakanishi H., Ishiguro S., Takami S., Tsuda K., Okamura S. Configuration of the virtual laboratory for fusion researches in Japan // Fusion Engineering and Design. – 2010. – V. 85. – P. 637–640.
8. Мезенцев А.А., Шарнин А.В., Павлов В.М., Овчинников А.В. DAQViewer – компьютерная программа визуализации и анализа экспериментальных данных Токамака КТМ // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 51–55.
9. Павлов В.М., Обходский А.В. и др. Разработка и исследование унифицированной программной системы для организации удалённого участия научно-исследовательских коллективов в экспериментах, проводимых на передовых отечественных и зарубежных Токамака: отчёт о НИР (Т. 2): 1–541. – Томск, 2011. – 800 с. – № ГР 01201176681. – Инв. № 01201176681.
10. Горюнов А.Г., Обходский А.В. и др. Разработка теоретических основ и создание унифицированного многокомпонентного программного комплекса распределённой обработки и хранения данных для обеспечения эффективности проведения экспериментальных исследований на импульсно-периодических и комплексах нового поколения: отчёт о НИР (Т. 1): 1–305. – Томск, 2011. – 973 с. – № ГР 01201176680. – Инв. № 01201176680.
11. Bertocci A., Padua S., Vitale V. The new FTU continuous monitoring system // Fusion Engineering and Design. – 2005. – V. 74. – P. 797–791.
12. Вознесенский В.А., Семенов И.Б. Международная система управления и сбора данных MDSPlus и возможности ее использования на российских токамаках // Препринт РНЦ «Курчатовский институт» № ИАЭ-6249/14. – М.: РНЦКИ, 2002. – 68 с.
13. Davis W., Roney P., Carroll T., Gibney T., Mastrovito D. Web interfaces to MDSplus Data // Fusion Engineering. – 2002. – № 62. – P. 176–179.
14. Соколов М.М. Разработка информационных систем для работы с экспериментальными данными установок управляемого термоядерного синтеза: дис.... канд. физ.-мат. наук. – М., 2004. – 149 с.
15. Sokolov M.M., Igonkina G.B., Koutcherenko I.Yu., Nurov D.N. New System For Tokamak T-10 Experimental Data Acquisition, Data Handling And Remote Access // AIP Conf. Proc. – 2007. – № 996. – P. 269–275.
16. Павлов В.М., Голобоков Ю.Н., Лысенко А.В. Программа управления экспериментальной физической установкой в пусковом режиме работы // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – № 3. – С. 81–87.

Поступила 21.03.2013 г.

## IMPLEMENTATION OF REMOTE PARTICIPATION AT TOKAMAK DEVICE EXPERIMENTS

A.A. Mezentsev, V.M. Pavlov, Yu.N. Golobokov, D.A. Evstifeev

Tomsk polytechnic university

The paper describes the software implementation of remote participation at Tokamak device experiment, particularly hardware remote control and monitoring implementation. This is an alternative to the traditional implementations based on such software kits as MDS+ and PK IVK used at Russian and foreign Tokamak devices: T-10, T-15, JET, JT-60, FTU. Traditional implementations are outdated and require deep modification for effective usage at new devices, so the new implementation is rather actual. The implementation is based on the use of new unified communication protocol for Tokamak subsystems – T-ICS. The protocol takes into account the individual peculiarities of subsystem hardware platform and provides the means of message encryption required for communication using Ethernet-based networks. The comparison of traditional approaches and the described implementation was also described. The implementation of the approach proposed was shown using a TRACE MODE SCADA for the experiment automation system hardware control at one of the foreign Tokamak devices. The use of the new implementation combined with SCADA allows significant automation of the applications development, simplifies hardware control and monitoring command language. At the present the software implementation was tested on the models of the active foreign Tokamak subsystems and it is currently used for model subsystem control. Because of the high potential of the mechanism is going to be integrated into control system of modified T-15 Russian tokamak.

**Key words:**

Remote participation, automatic control system, CAD-system, TRACE MODE, T-ICS protocol.

**REFERENCES**

1. McHarg B.B., Casper T.A., Davis S., Greenwood D. Tools for remote collaboration on the DIII-D national fusion facility. *Fusion Engineering and Design*, 1999, vol. 43, pp. 343–355.
2. Nagayama Y. Control, data acquisition, data analysis and remote participation in LHD. *Fusion Engineering and Design*, 2008, vol. 83, pp. 170–175.
3. Vega J., Sanchez E., Portas A., Pereira A., Mollinedo A. Overview of the TJ-II remote participation system. *Fusion Engineering and Design*, 2006, vol. 81, pp. 2045–2050.
4. Oshima T. Development of environment for remote participation in fusion research on JT-60. *Fusion Engineering and Design*, 2004, vol. 71, pp. 239–244.
5. Luchetta A., Manduchi G., Taliere C. MDSplus data acquisition in RFX and its integration in legacy systems. *Fusion Engineering and Design*, 2003, vol. 66–68, pp. 959–963.
6. Suttrop W., Kinna D., Farthing J., Hemming O., How J., Schmidt V. Remote Participation at EFDA–JET Task Force Work, Experience and Priorities from a User's Point of View. *Preprint European Fusion Development Agreement № EFDA–JET–PR (01)19*, 2001, 8 p.
7. Yamamoto T., Nagayama Y., Nakanishi H., Ishiguro S., Takami S., Tsuda K., Okamura S. Configuration of the virtual laboratory for fusion researches in Japan. *Fusion Engineering and Design*, 2010, vol. 85, pp. 637–640.
8. Mezentsev A.A., Sharnin A.V., Pavlov V.M., Ovchinnikov A.V. DAQViewer – компьютерная программа визуализации и анализа экспериментальных данных Tokamaka KTM [The KTM Tokamak Experimental Data Visualization and Analysis Software]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 5, pp. 51–55.
9. Pavlov V.M., Obkhodskiy A.V. *Razrabotka i issledovanie unifikirovannoy programnoy sistemy dlya organizatsii udalennogo uchastiya nauchno-issledovatel'skikh kolektivov v eksperimentakh, provodimykh na peredovykh otechestvennykh i zarubezhnykh Tokamakakh. Otchet o NIR* [The Development and Research of Unified Software System for Remote Participation of Scientific Research Groups at Leading Native and Foreign Tokamaks. Scientific report]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2011, vol. 2, 800 p.
10. Goryunov A.G., Obkhodskiy A.V. *Razrabotka teoreticheskikh osnov i sozdanie unifikirovannogo mnogokomponentnogo programno-kompleksa raspredelennoy obrabotki i khraneniya dannykh dlya obespecheniya effektivnosti provedeniya eksperimentalnykh issledovaniy na impulsno-periodicheskikh i kompleksakh novogo pokoleniya. Otchet o NIR* [The Development of Theoretical Basis and Creation of Unified Multicomponent Software Complex of Distributed Data Storage and Processing for Effective Experimental Research at Pulse-Periodic and New Generation Complexes. Scientific report]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2011, vol. 1, 973 p.
11. Bertocci A., Padda S., Vitale V. The new FTU continuous monitoring system. *Fusion Engineering and Design*, 2005, vol. 74, pp. 797–791.
12. Voznesenskiy V.A., Semenov I.B. Mezhdunarodnaya sistema upravleniya i sbora dannykh MDSPPlus i vozmozhnosti ee ispolzovaniya na rossiyskikh tokamakakh [The MDSPPlus International System for Data Management and Storage and Possibility of Its Usage at Russian Tokamaks]. *Pre-print of RSC «Kurchatov institute»*. Moscow, 2002, 68 p.
13. Davis W., Roney P., Carroll T., Gibney T., Mastrovito D. Web interfaces to MDSplus Data. *Fusion Engineering*, 2002, no. 62, pp. 176–179.
14. Sokolov M.M. *Razrabotka informatsionnykh sistem dlya raboty s eksperimentalnymi dannymi ustanovok upravlyаемого термоядерного синтеза*. Diss. kand. fiz.-mat. Nauk [The Development of Information Systems for Controlled Fusion Devices Experimental Data Management Cand. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2004. 149 p.
15. Sokolov M.M., Igonkina G.B., Koutcherenko I.Yu., Nurov D.N. New System For Tokamak T-10 Experimental Data Acquisition, Data Handling And Remote Access. *AIP Conf. Proc.*, 2007, no. 996, pp. 269–275.
16. Pavlov V.M., Golobokov Yu.N., Lysenok A.V. Programma upravleniya eksperimentalnoy fizicheskoy ustanovkoy v puskovom rezhime raboty [The Software For On-line Control Of Experimental Physical Device]. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2011, no. 3, pp. 81–87.

# Алгоритмическое и программное обеспечение

УДК 004.932

## ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО КОДЕРА JPEG НА SoC ARM i.MX233 С ПОДДЕРЖКОЙ КОНТРОЛЯ БИТРЕЙТА

Д.В. Сидоров, А.Н. Осокин\*

ОАО «Томское пиво», г. Томск

\*Томский политехнический университет

E-mail: osokin@vt.tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания алгоритмов сжатия изображений с регулируемым битрейтом для использования при ограниченности вычислительных ресурсов (реализация на промышленных контроллерах), ширины каналов передачи данных, патентных ограничений и т. д.

**Цель работы:** исследование реализованной на ARM i.MX233 нересурсоемкой модификации стандартного алгоритма сжатия JPEG, которая, в отличие от оригинала, обладает возможностью контролировать битрейт сжатых изображений и позволяет использовать любую стандартную реализацию JPEG-декодера для распаковки изображений.

**Методы исследования:** в работе использованы методы теории информации, теории алгоритмов, математической статистики и объектно-ориентированного программирования.

**Результаты:** реализован модифицированный кодер стандарта JPEG для системы на кристалле ARM i.MX233, позволяющий контролировать битрейт сжатых изображений. Проведено его исследование на произвольных изображениях, полученных с Web-камеры. Показано, что предложенный кодер с функцией контроля битрейта сжимает изображения быстрее, чем распространенный свободный аналог *cjpeg*.

### Ключевые слова:

Кодер JPEG, алгоритм контроля битрейта, ARM система на кристалле i.MX233, ОС Linux.

### Введение

Непрерывное совершенствование норм технологического процесса производства сложных полупроводников позволяет выпускать процессоры и системы на кристалле (SoC), которые характеризуются высокой степенью интеграции, производительностью, низким энергопотреблением и способны решать широкий спектр задач в промышленности и потребительском секторе [1]. Одной из таких задач является создание подсистемы видеонаблюдения и видеорегистрации в существующих системах управления и мониторинга производством на основе SoC. Эта задача требует создания такого программного кодера сжатия изображений, который бы относительно легко встраивался в уже существующие системы (например, в виде программного модуля или службы), использовал минимальное количество ресурсов (процессорное время, ОЗУ и т. п.), работал на возможно большем количестве SoC-систем и предъявлял малые требования к ширине канала передачи данных. Решением такой

задачи может служить модифицированный и реализованный авторами нересурсоемкий кодер JPEG с функцией контроля битрейта, для которого декодером может быть любая реализация JPEG в пределах стандарта [2].

### Модификация кодера JPEG

Основная идея предложенной модификации кодера JPEG сводится к предположению о том, что существует близкая к линейной зависимость между количеством бит, необходимых для представления всего сжатого изображения, и количеством бит, необходимых для представления заданного количества сжатых ДКП-блоков изображения. Другими словами, во время поиска необходимого коэффициента квантования (качества)  $Q$  при JPEG-сжатии, например, методом дихотомии на отрезке  $Q_n \in [5, 100]$  можно ограничиться перекодированием (сжатием) небольшого предварительно заданного количества ДКП-блоков, тем самым значительно снизив вычислительную сложность алго-

ритма (количество обработанных пикселей). Более подробная информация о модификации содержится в работе [3].

Модифицированный кодер реализован на языке C++ в виде клиент-серверного приложения (фоновой службы) для ОС Linux, которое считывает изображения с Web-камеры, сжимает их и передает клиенту через последовательный интерфейс RS-232. Выбор такого способа программной реализации позволяет серверному приложению:

- работать практически на любой архитектуре (ARM, x86-32, x86-64, MIPS), которая способна поддерживать ОС Linux;
- передавать данные по наиболее распространенным сетям связи в промышленности (RS-232, RS-422, RS-485);
- практически не зависеть от архитектуры и программного обеспечения клиента, клиент должен только уметь декодировать полученное изображение согласно стандарту JPEG;
- работать параллельно и независимо от основного программного обеспечения системы управления и мониторинга;
- создать автономную, основанную на SoC цифровую видеокамеру.

Взаимодействие между клиентом и серверным приложением осуществляется согласно следующему алгоритму:

*Начало.*

1. Клиент через последовательный порт запрашивает сжатое изображение с заданным коэффициентом сжатия.
2. Сервер (фоновая служба) считывает исходное изображение с Web-камеры и сжимает его с заданным клиентом коэффициентом сжатия.
3. По окончании сжатия сервер помещает изображение в ОЗУ (если в ОЗУ было старое изображение, то оно перезаписывается) и сообщает клиенту о размере сжатого изображения и количестве блоков, которыми он может его получить.
4. Клиент, исходя из загруженности канала передачи данных и других критериев, запрашивает изображение фиксированными блоками.
5. Следующее изображения клиент получает аналогичным образом, т. е. повторяя шаги 1–4.

*Конец.*

Предложенная реализация серверного приложения была скомпилирована, запущена и исследована на собранном авторами испытательном стенде на основе SoC ARM i.MX233.

#### Испытательный стенд на SoC ARM i.MX233

Семейство RISC процессоров ARM и SoC, построенных на их основе, широко и успешно используются в промышленной автоматике, системах с программируемыми логическими контроллерами и человеко-машинных интерфейсах, т. к. обеспечивают одно из лучших соотношений производительность/энергопотребление [4]. Современные производители полупроводников предлагают широкую номенклатуру ARM процессоров и SoC,

отличающихся по функционалу, производительности и энергопотреблению: от малопроизводительных одноядерных контроллеров семейства ARM7TDMI с частотой 16,8 МГц до двухядерных (четырёхядерных) SoC семейства CORTEX-A15 с частотой до 2,5 ГГц.

В промышленных системах автоматизации и управления с развитым человеко-машинным интерфейсом широко распространены ARM SoC с частотами ядра от 200 до 800 МГц. Связано это в первую очередь с возможностью этих SoC поддерживать ОС высокого уровня, таких как Windows CE/RT, Linux и обеспечивать полноценный графический интерфейс взаимодействия с пользователем, что позволяет значительно упростить и сократить цикл разработки программного обеспечения [5].

Одним из таких SoC является i.MX233 от компании Freescale [6]. Среди аналогичных решений от других производителей, например семейства ARM9 Sitara от Texas Instruments [5], SPEAr3xx от STMicroelectronics [7], LPC31xx и LPC32xx от NXP [8], SAM9X и SAM9M от Atmel [9], i.MX233 обладает богатым набором периферийных устройств и внешних портов, одним из лучших соотношений цена/производительность, достаточной производительностью для решения широкого круга задач (частота ядра до 454 МГц), высокой энергоэффективностью (потребляемая мощность до 0,5 Вт) и хорошей программной поддержкой от производителя в течение 10 лет со дня выпуска образцов (собственная модификация ядра Linux, программные библиотеки для работы с изображениями и видео и т. п.).

Испытательный стенд на SoC i.MX233 был создан авторами на основе прототипа платы Prospero C100 от фирмы Siqube [10], который может выступать в роли аналога реальных систем управления и мониторинга производством. Прототип Prospero C100 обладает следующими основными характеристиками:

- размер 43×62 мм;
- частота ядра ARM9 400 МГц;
- объем ОЗУ DDR I 64 Мб, частота шины 200 МГц;
- диапазон напряжения блока питания  $\pm 7-20$  В;
- microSD разъем для твердотельных накопителей;
- порт LVDS для подключения монитора;
- один USB 2.0 хост порт, обеспечивающий питающий ток до 1,5 А.

Созданный стенд также включает в себя следующий набор периферийных устройств: последовательные порты RS-232, Web-камера и Fast Ethernet адаптер, которые были подключены посредством USB-хаба к шине USB 2.0 (рисунок; штрихпунктирной линией обведен минимальный набор аппаратуры, необходимый для функционирования предложенного кодера).

Стенд управляется ОС Debian Linux 6.0 с ядром 2.6.31, которая загружается с microSD флеш карты.

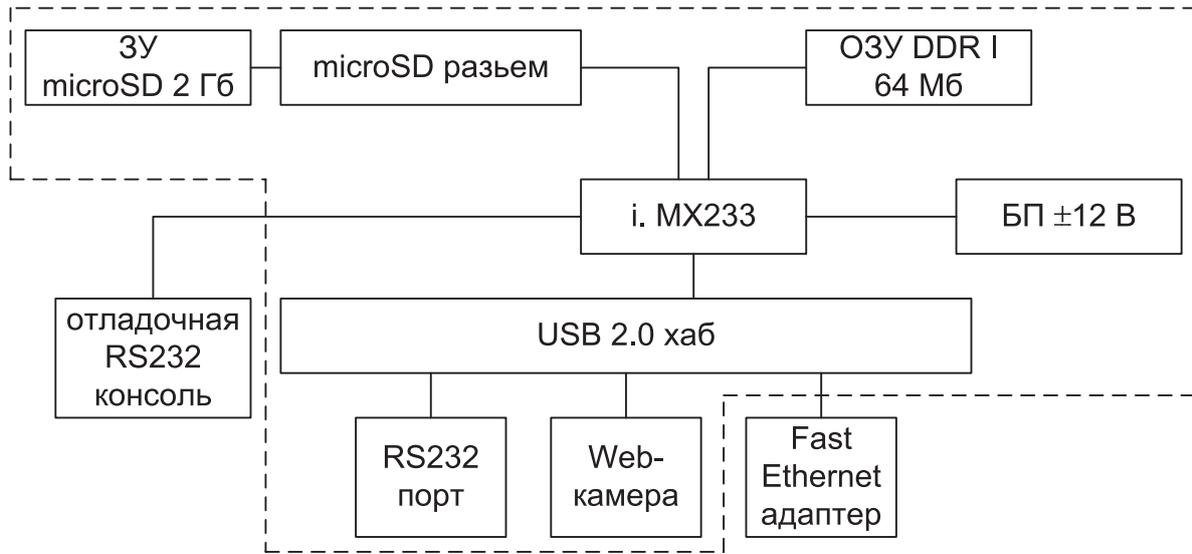


Рисунок. Схема испытательного стенда на SoC i.MX233

### Исследование кодера на время сжатия

Целью исследования реализованного на i.MX233 кодера JPEG является получение количественных характеристик времени сжатия произвольных изображений, полученных с Web-камеры.

Результаты исследования кодера на способность соблюдать заданный битрейт приведены в работе [3], там же подробно рассмотрен вопрос качества распакованных изображений.

Исходные данные для исследования:

- произвольные полутоновые изображения, полученные с Web-камеры, размером 640×480 пикс. с глубиной яркости 8 бит на пикс.;
- количество кодируемых ДКП-блоков  $n=7,5\%$ ;
- коэффициент сжатия  $K \in [4,30]$ , шаг 1;

Максимальное значение коэффициента сжатия  $K$  ограничено 30, т. к. при дальнейшем его увеличении качество распакованных изображений становится неприемлемым. Процент сжимаемых ДКП-блоков был взят из работы [3]. Замеры времени сжатия производились как среднее за 500 итераций для каждого коэффициента сжатия. Исходное и сжатые изображения в ходе измерений хранились в ОЗУ. Средство измерения времени – интегрированные часы реального времени с погрешностью порядка 1 мс (время переключения планировщика процессов ОС Linux).

Время сжатия предложенного алгоритма (таблица) сравнивалось с наиболее распространенной свободной реализацией стандарта JPEG–сjreg, которая не обладает возможностью контроля битрейта [11]. Предложенный кодер и сjreg компилировались на стенде одним и тем же компилятором с одинаковыми ключами оптимизации. Размер приложения, занимаемый на твердотельном накопителе, 67 кб, в ОЗУ – 1,2 Мб (для изображения 640×480 пикс. с глубиной 8 бит на пикс.). Параметры сжатия сjreg были подобраны так, чтобы основные этапы сжатия совпадали с аналогичными в

предложенном кодере, т. е. использовалось binDCT и оптимизированные таблицы Хаффмена.

Таблица. Сравнение времени сжатия предложенного кодера с кодером алгоритма сjreg, реализованных на SoC i.MX233

K	Q	Время сжатия (мс)	
		Модифицированного кодера	сjreg реализации
4	86	205	285
5	80	204	284
6	76	205	286
7	66	202	285
8	57	200	282
9	46	201	283
10	42	205	284
11	39	202	281
12	31	200	280
13	28	204	282
14	25	204	282
15	23	202	283
16	21	202	282
17	20	201	282
18	18	201	281
19	17	200	281
20	16	201	281
21	16	202	281
22	14	201	282
23	12	200	281
24	12	201	280
25	11	202	280
26	10	200	280
27	10	201	280
28	10	200	280
29	9	200	280
30	9	200	280
Среднее время		201,7	281,77

Согласно полученным результатам можно сделать следующие выводы: во-первых, кодер может

быть успешно применен на недорогих SoC, поддерживающих ОС высокого уровня; *во-вторых*, он обеспечивает меньшее время сжатия, чем распространенная свободная реализация sjpeg (аналог не обладает функцией контроля битрейта), *в-третьих*, благодаря малому времени сжатия, можно снизить вычислительную нагрузку на процессорный блок SoC и тем самым, например, повысить время автономной работы от аккумуляторных батарей.

Предложенный кодер и его реализация, в отличие от распространенных аналогов, обладает малой вычислительной ресурсоемкостью (меньшим временем сжатия), приемлемой точностью контроля битрейта, не модифицирует схему JPEG-сжатия (распаковка сжатого изображения может быть осуществлена любым декодером JPEG) и, как следствие, может быть с успехом применен при добавлении функций видеонаблюдения и видеорегистрации в существующие системы управления и мониторинга. Благодаря невысоким требованиям предложенной реализации кодера, в систему управ-

ления могут быть дополнительно введены функции автоматической фокусировки/позиционирования камеры на объект, поиска движения в поле зрения камеры и т. д.

#### Выводы

1. Предложена реализация кодера JPEG, которая в процессе сжатия и контроля битрейта использует малое количество вычислительных ресурсов процессора и может быть успешно использована на недорогих SoC.
2. Проведено исследование кодера на SoC i.MX233 под управлением ОС Linux на произвольных изображениях, полученных с Web-камеры, которое показало, что предложенный кодер с функцией контроля битрейта сжимает изображения быстрее, чем распространенный свободный аналог sjpeg.

*Авторы выражают признательность и благодарят главу компании Siquibe Баранова Александра за помощь в сборке, настройке и запуске испытательного стенда.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. System-on-chip technology comes of age. 2012. URL: <http://www.eetimes.com/design/power-management-design/4397940/System-on-Chip-technology-comes-of-age> (дата обращения: 12.10.2012).
2. ITU-CCITT Recommendation T.81 Information technology. 1992. URL: <http://www.w3.org/Graphics/JPEG/itu-t81.pdf> (дата обращения: 13.11.2013).
3. Сидоров Д.В., Осокин А.Н. Простой алгоритм контроля битрейта кодера стандарта JPEG // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320. – № 5. – С. 70–73.
4. ARM – The Architecture for the Digital World. 2012. URL: <http://www.arm.com> (дата обращения: 13.10.2012).
5. Обзор платформ цифровых сигнальных процессоров и микропроцессоров на базе ядра ARM компании Texas Instruments. 2012. URL: [http://www.ti.com/ww/ru/sitara\\_whatsnew.html](http://www.ti.com/ww/ru/sitara_whatsnew.html) (дата обращения: 10.12.2012).
6. i.MX233 Product Summary Page. 2012. [http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod\\_summary.jsp?code=i.MX233](http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=i.MX233) (дата обращения: 27.12.2012).
7. SPEAr Embedded Microprocessors – STMicroelectronics. 2012. URL: <http://www.st.com/internet/mcu/subclass/1156.jsp> (дата обращения: 12.12.2012).
8. ARM9, NXP Semiconductors. 2012. URL: <http://www.nxp.com/products/microcontrollers/arm9/#products> (дата обращения: 24.12.2012).
9. ARM based microcontrollers. 2013. URL: <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/arm/default.aspx> (дата обращения: 8.03.2013).
10. ООО «ЭК-Мобайл» Prospero C100. 2012. URL: <http://www.ec-mobile.ru/47prospero/> (дата обращения: 4.03.2012).
11. Independent JPEG Group. 2013. URL: <http://www.iijg.org> (дата обращения: 13.05.2013).

*Поступила 11.09.2013 г.*

UDC 004.932

## RESEARCH FOR COMPRESSING TIME OF MODIFIED JPEG ENCODER WITH BIT RATE CONTROL ON ARM-BASED SoC i.MX233

D.V. Sidorov, A.N. Osokin\*

Tomskoe pivo, Tomsk

\*Tomsk Polytechnic University

**The urgency** of the discussed issue is caused by the necessity to develop the algorithms for image compressing with the possibility to use them in the context of limited computational resources, bandwidth of data channels, patent restrictions, etc.

**The main aim of the study** is to research the implementation on ARM-based SoC i.MX233 of modified JPEG encoder which allows controlling bit rate and using any standard JPEG decoder to decode compressed images.

**The methods used in the study:** methods of information theory, theory of algorithms, mathematical statistics and object-oriented programming.

**The results:** the proposed a modification of the standard JPEG encoder for compressing gray-scale images with bit rate control was implemented. The encoder has a simple program implementation, low computational complexity and, as a consequence, low compression time. A study for measuring the compression time of arbitrary gray-scale images from Web-camera on the SoC i.MX233 was conducted on the encoder. The results of the study show that the encoder proposed compresses the images faster than the open source analog cjpeg.

### Key words:

JPEG coder, bit rate control, ARM SoC i.MX233, OS Linux.

### REFERENCES

1. *System-on-chip technology comes of age*. 2012. Available at: <http://www.eetimes.com/design/power-management-design/4397940/System-on-Chip-technology-comes-of-age> (accessed 12 October 2012).
2. *ITU-CCITT Recommendation T.81 Information technology*. 1992. Available at: <http://www.w3.org/Graphics/JPEG/itu-t81.pdf> (accessed 13 November 2013).
3. Sidorov D.V., Osokin A.N. Prostoy algoritm kontrolya bitreyta kodera standarta JPEG [Simple bit rate algorithm for JPEG encoder]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 5, pp. 70–73.
4. *ARM – The Architecture for The Digital World*. 2012. Available at: <http://www.arm.com> (accessed 13 October 2012).
5. *Obzor tsifrovyykh signalnykh protsessorov i mikroprotsessorov na baze yadra ARM kompanii Texas Instruments* [Review of ARM-based digital signal processors and microprocessors from Texas Instruments]. 2012. Available at: [http://www.ti.com/ww/ru/sitara\\_whatsnew.html](http://www.ti.com/ww/ru/sitara_whatsnew.html) (accessed 10 December 2012).
6. *i.MX233 Product Summary Page*. 2012. [http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod\\_summary.jsp?code=i.MX233](http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=i.MX233) (accessed 27 December 2012).
7. *SPEAr Embedded Microprocessors – STMicroelectronics*. 2012. Available at: <http://www.st.com/internet/mcu/subclass/1156.jsp> (accessed 12 December 2012).
8. *ARM9. NXP Semiconductors*. 2012. Available at: <http://www.nxp.com/products/microcontrollers/arm9/#products> (accessed 24 December 2012).
9. *ARM based microcontrollers*. 2013. Available at: <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/arm/default.aspx> (accessed 8 March 2013).
10. «EK-Mobayl» *Prospero C100*. 2012. Available at: <http://www.ec-mobile.ru/47prospero/> (accessed 4 March 2012).
11. *Independent JPEG Group*. 2013. Available at: <http://www.ijg.org> (accessed 13 May 2013).

УДК 004.41[2+4+5]:004.272::004.855

## УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ

А.А. Орлов

Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники  
E-mail: d1scnc@gmail.com

*В предыдущих работах автором была предложена универсальная программная платформа, позволяющая реализовать известные алгоритмы метода группового учета аргументов, базисы, методы обучения и критерии селекции моделей. В статье приводится решение актуальной задачи увеличения производительности этой платформы. На основе проведенного обзора существующих архитектур вычислительных систем для параллельной обработки данных и программных систем индуктивного моделирования с поддержкой параллельных вычислений выработаны требования к подсистемам параллельных вычислений и управления памятью программной платформы. С использованием методологии объектно-ориентированного анализа и проектирования разработана объектно-ориентированная структура этих подсистем, приведены особенности их работы для каждой из указанных архитектур вычислительных систем. Производительность параллельной реализации комбинаторного алгоритма метода группового учета аргументов на базе программной платформы оценена экспериментально для многоядерных процессоров.*

### Ключевые слова:

*Программная платформа, объектно-ориентированный анализ и проектирование, параллельная обработка данных, эффективность распараллеливания, метод группового учета аргументов.*

### Введение

Метод группового учета аргументов (МГУА) является методом структурно-параметрической идентификации сложных объектов, процессов и систем по данным наблюдений в условиях неполноты информации [1]. МГУА показал свою эффективность в самых различных областях: распознавание образов, нахождение физических и нефизических закономерностей, идентификация нелинейных систем, краткосрочное и долгосрочное прогнозирование стационарных и нестационарных процессов, управление сложными техническими объектами и в др. приложениях [2–4]. Столь широкое применение МГУА обусловило разработку множества алгоритмов метода, относящихся к различным типам: параметрических (комбинаторных и итерационных [5]), непараметрических [6. С. 103–124] и многорядных [7]. При этом зачастую реализация алгоритмов сопровождалась разработкой программного обеспечения «с нуля», как то Knowledge Miner [6. С. 147–176], FAKE GAME [8], GMDH Shell [9], ППП МГУА [10], GEvoM [11] и т. д. В работе [12] автором была показана актуальность создания единой программной платформы (далее по тексту – «Платформа МГУА»), позволяющей реализовать все известные алгоритмы МГУА, были выработаны требования к архитектуре (гибкости, универсальности и производительности), и предложена объектно-ориентированная структура такой программной платформы. Данная статья посвящена решению задачи увеличения производительности предложенной программной платформы МГУА.

### Анализ механизмов распараллеливания вычислений в существующих программных системах МГУА и аппаратных архитектурах с целью выработки требований к увеличению производительности единой программной платформы

МГУА, являясь индуктивным методом [1], осуществляет построение модели по некоторой выборке данных путем перебора структур моделей различной сложности из некоторого заданного множества. В связи с этим все алгоритмы МГУА, несмотря на их разнообразие [2, 13], начинают работу с генерации моделей на основе заданного множества структур. Параметрические алгоритмы МГУА следующим шагом осуществляют расчет параметров сгенерированных моделей таким образом, чтобы для каждой модели максимизировать значение заданного критерия качества («обучение моделей» – решение задачи параметрической оптимизации). После этого производится оценка каждой модели с использованием заданного внешнего критерия селекции моделей, причем, как правило, при этом используется часть выборки данных, не использовавшаяся при обучении моделей («расчет критерия»). Выбор модели оптимальной сложности («селекция моделей») осуществляется на основании значения критерия для каждой модели.

Как правило, качество результирующей модели с точки зрения внешнего критерия получается тем выше, чем большее количество моделей-кандидатов было обработано в процессе работы алгоритма МГУА. Увеличение количества моделей, в свою очередь, приводит к соответствующему уве-

личению времени работы алгоритмов МГУА, являющихся по своей сути переборными (например, для построения полиномиальной модели максимальной степени 2 для выборки данных из трех входных аргументов и одной выходной величины с помощью комбинаторного алгоритма МГУА требуется осуществить генерацию, обучение и применение критерия для 1024 моделей; при максимальной степени 3 –  $3 \cdot 10^6$  моделей; 4 –  $3 \cdot 10^{10}$  моделей [14]). Таким образом, качество результирующей модели тем выше, чем большее количество моделей обрабатывается в единицу времени, то есть чем более производительной является реализация алгоритма в рамках платформы МГУА.

Одним из способов повышения производительности является уменьшение времени, затрачиваемого на осуществление этапов генерации, обучения и применения критерия к каждой модели. Это возможно как путем алгоритмической оптимизации, так и используя различные приемы программной оптимизации [15, 16], применение которых специфично для каждой конкретной реализации каждого алгоритма в рамках единой платформы МГУА. С другой стороны, алгоритмы МГУА производят обучение и расчет значения критерия для каждой модели независимо от других моделей. Это позволяет проводить данные операции *параллельно* для всех моделей, кратно увеличивая производительность расчетов. В этом случае организация параллельных вычислений является ответственностью самой платформы МГУА.

В табл. 1 приведены программные системы индуктивного моделирования, реализующие алго-

ритмы МГУА и поддерживающие параллельные вычисления. Для каждой из систем приведено краткое описание способа распараллеливания – для всех систем характерен подход, основанный на выделении групп моделей, обрабатываемых независимо. Также приведены параметры экспериментов и практически полученный прирост производительности (рассчитываемый как отношение  $\tau_p = t_1/t_p$  времени вычислений без распараллеливания  $t_1$  и с распараллеливанием  $t_p$ ). Из табл. 1 видно, что независимо от конкретных особенностей алгоритма МГУА и выборки данных эффективность распараллеливания ( $\eta_p = \tau_p/P$ , где  $P$  – число параллельных потоков вычислений) может достигать величин выше 0,9.

В правой части табл. 1 указаны известные на сегодняшний день архитектуры вычислительных систем для параллельной обработки данных: от потоковых процессоров до распределенных систем. Плюсом отмечены ячейки тех архитектур, для которых описана поддержка со стороны соответствующей системы моделирования. Как видно из таблицы, все системы ориентированы на использование МЯП и МПС в качестве основной архитектуры, а Parallel Combi обладает поддержкой КЛ.

Рассмотрим подробнее упомянутые в табл. 1 архитектуры для параллельной обработки данных. Далее приводятся только аппаратные конфигурации, обладающие поддержкой набора команд x86 или AMD64 [20], как наиболее распространенные в настоящее время (например, по состоянию на июнь 2013 г. суммарная производительность 500 самых мощных суперкомпьютеров в мире со-

Таблица 1. Обзор программных систем МГУА, поддерживающих параллельные вычисления

Система моделирования	Описание способа распараллеливания	Эксперимент				Поддержка параллельной архитектуры				
		Параметры эксперимента	Вычислительная машина	Прирост производительности $\tau_p$	Эффективность $\eta_p$	ПП	МЯП	МПС	КЛ	РС
FAKE GAME [8, 17]	Распределение нейронов одного слоя сети по вычислительным потокам для параллельного обучения	Выборка данных: 8 переменных, 300 точек. 5 базисов моделей	(2): Intel Core 2 Duo E6550, 2,33 ГГц (8): 2x Intel Xeon E5430, 4 ядра, 2,66 ГГц Java, Threads	(2): 1,65–1,78 (8): 3,36–3,62	(2): 0,82–8,89 (8): 0,42–0,45	-	+	+	-	-
Knowledge Miner [6, 18]	Распределение моделей, перебираемых в каждом нейроне одного слоя, по вычислительным потокам	Выборка данных: 7 переменных, 10–100000 точек. Дважды многоядерная сеть МГУА, двухвходовые нейроны. Полиномиальный базис	2x Intel Xeon E5472, 4 ядра, 3,0 ГГц, 8 ГБ RAM Apple's Accelerate + Intel Building Blocks	(8) 32 bit: 7,8 64 bit: 7,7 при SIMD оптимиз.: 32 bit: 7,6 64 bit: 7,4	(8) 32 bit: 0,98 64 bit: 0,96 при SIMD оптимиз.: 32 bit: 0,94 64 bit: 0,92	-	+	+	-	-
Parallel Combi [14, 19]	Распределение групп моделей по узлам кластера: (а) «последовательное», (б) «двоичное дополнение» [14]	Комбинаторный алгоритм Полиномиальный базис	HPC Cluster, 26 узлов, Intel Xeon 2,3 ГГц MPI	(26) (а) 14,9 (б) 24,9	(26) (а) 0,57 (б) 0,96	-	+	+	+	-

ПП – Потоковые процессоры, МЯП – Многоядерные процессоры, МПС – Многопроцессорные системы, КЛ – Кластеры, РС – Распределенные системы, HPC – High Performance Cluster (Высокопроизводительный кластер), MPI – Message Passing Interface (Интерфейс передачи сообщений).

ставляет 226,7 PFLOPS, из них на долю x86 и AMD64 систем приходится 159,4 PFLOPS, или 71,2 % [21]).

С целью анализа аппаратных конфигураций особенности их архитектуры, включая организацию памяти и оценку производительности, сведены автором в единую табл. 2. Причем информация в данной таблице была структурирована с точки зрения как наглядности восприятия информации, так и полноты анализа. В таблице приводится следующая информация.

1. Примеры систем параллельной обработки данных, соответствующие конкретной реализации каждой архитектуры. При этом рассматриваемые архитектуры расположены в таблице в порядке повышения уровня иерархии. Например, РС могут содержать в своем составе как КЛ, так и МПС. В свою очередь, вычислительные узлы КЛ и МПС основаны на использовании в своем составе МЯП и ПП.
2. Принадлежность к одному из классов параллельных систем, предложенных Э. Таненбаумом [22. С. 38–44]: мультипроцессорам, характеризующимся наличием общей разделяемой памяти, или мультикомпьютерам, имеющим лишь доступную извне локальную память в каждом узле.
3. Принадлежность к одному из классов параллельных архитектур, выделяемых Р. Дунканом в работе [23]: централизованным синхронным системам (SIMD-производные), системам с однородным доступом в разделяемую общую (MIMD-Shared Memory) или частную память узлов (MIMD-Distributed Memory), параллельным гибридным системам (MIMD paradigm).
4. Краткая характеристика вычислительных узлов, составляющих параллельную систему, включая оценку производительности вычислителя (число миллионов операций с плавающей точкой одинарной и двойной точности в секунду), оценку объема локальной памяти и классификацию по М. Флинну [24] (SISD/SIMD/MISD/MIMD – Single/Multiple Instruction stream, Single/Multiple Data stream). Также приводится максимальная суммарная производительность вычислительных узлов в составе параллельной системы (произведение производительности одного узла на максимальное их количество).
5. Оценка времени доступа (латентность – время с момента генерации запроса на данные из памяти до момента их фактического получения), пропускной способности (для удобства приведена в Гбайт/с) и объема памяти параллельной системы.

На основании анализа табл. 2 можно сделать следующие выводы.

1. Наибольшей суммарной производительностью обладают параллельные системы, относящиеся к классу Мультикомпьютеров по классификации Таненбаума [22]. Причиной этому является

большее относительно других систем количество вычислительных узлов в составе системы. Недостатком подобных систем является высокая латентность доступа к разделяемой памяти системы, что делает неэффективным распараллеливание относительно небольших вычислительных задач (например, при числе моделей, перебираемых алгоритмом МГУА, сопоставимом с числом вычислительных узлов в системе), поскольку накладные расходы на передачу данных и синхронизацию будут компенсировать прирост производительности от увеличения количества используемых вычислительных мощностей (узлов).

2. Мультипроцессорные системы (особенно ПП и МЯП) позволяют максимизировать эффективность распараллеливания путем минимизации издержек на передачу данных и синхронизацию (по сравнению с КЛ и РС), однако обладают ограниченной производительностью.
3. Все вычислительные узлы классифицированы как SIMD или MIMD [24]. Это дает возможность организовывать «внутреннее распараллеливание» вычислений в каждом узле (low-level parallelism в терминологии Дункана [23]) – применительно к реализации алгоритмов МГУА за счет этого возможен дополнительный прирост производительности путем повышения скорости параметрической оптимизации.
4. Все системы обладают существенно различающейся латентностью локальной памяти вычислительного узла и разделяемой памяти системы (на порядок и более).

На основании данных выводов сформулируем **требования к реализации механизмов параллельных вычислений в рамках платформы МГУА.**

1. Унифицированная поддержка *всех* известных параллельных архитектур (ПП, МЯП, МПС, КЛ, РС). С одной стороны, это необходимо для максимального охвата экспериментов по индуктивному моделированию с точки зрения их ресурсоемкости. С другой стороны, это ослабляет ограничения на состав аппаратных вычислительных средств пользователя, требующихся для проведения индуктивного моделирования.
2. Эффективность планирования. Алгоритмы планирования и синхронизации [31. С. 181–190] должны распределять вычислительные задачи в рамках используемой программной системы таким образом, чтобы минимизировать общее время вычислений (в том числе при использовании разнородных систем, например КЛ на основе ПП и МЯП).
3. Эффективность управления памятью. Алгоритмы управления памятью [31. С. 216–230] должны обеспечивать возможность полного использования локальной памяти вычислительных узлов с целью компенсации высокой латентности доступа в разделяемую память системы.

**Таблица 2.** Архитектуры параллельной обработки данных

Наименование архитектуры	Архитектура			Вычислительный модуль			Суммарная производительность, GFLOPS	Память			Примеры реализации	
	Вид	Классификация по Таненбауму [22]	Классификация по Дункану [23]	Число модулей	Производительность модуля, GFLOPS	Классификация по Флинну [24]		Объем локальной памяти на модуль	Латентность	Пропускная способность, Гбайт/с		Объем, Гбайт
AMD Tahiti [25]	ПП		MIMD-Wavefront	28–32 ALU: 1792–2048	[1 ГГц] SP: 128,0 DP: 32,0 ALU: SP: 2,0 DP: 0,5	SIMD ALU: SISD	Регистры: 64 кБ Разделяемая: 64 кБ L1: 16 кБ	SP: 4096 DP: 1024	10 нс	240–576	3	FirePro W8000, Radeon HD7970
NVIDIA Kepler GK104 [26]				6–8 ALU: 1152–1536	[1,05 ГГц] SP: 380,0 DP: 130,0 ALU: SP: 2,0 DP: 0,6	SIMD ALU: SISD	Регистры: 256 кБ Разделяемая+ L1: 64 кБ	SP: 3090 DP: 1040	10 нс	192–224	4	Quadro K5000, GeForce GTX770, GeForce GTX680
Intel Xeon Phi [27]	МЯП		MIMD-Shared memory	61	[1,2 ГГц] SP: 19,8 DP: 9,9	SIMD	L1: 32+32 кБ L2:512 кБ	SP: 1200 DP: 600	10 нс	352	16	Xeon Phi 7120
AMD K10 [28]				2–6 (12 в CM)	[3 ГГц] (SSE2) SP: 24,0 DP: 12,0	SIMD	L1: 64+64 кБ L2:512 кБ L3:6144 кБ	SP: <144 DP: <72	10 нс	10,6	16 (256 в CM)	Phenom II 960T
AMD Bulldozer [15]				1–4 (16 в CM)	[4 ГГц] (AVX) SP: 32,0 DP: 16,0	SIMD/ MIMD	L1: 32+128 кБ L2:2048 кБ L3:8192 кБ	SP: <128 DP: <64	10 нс	14,9	32 (256 в CM)	FX-8170, Opteron 6276
Intel Sandy Bridge [16. С. 36–53]				1–6 (8 в CM)	[3,5 ГГц] (SSE2) SP: 28,0 DP: 14,0	SIMD/ MIMD	L1: 32+32 кБ L2:256 кБ L3:8192 кБ	SP: <168 DP: <84	10 нс	10,6	32 (256 в CM)	i7–2600K, Xeon E5–1600
Intel Haswell [16. С. 31–36]				2–4 (16 в CM)	[3,5 ГГц] (SSE2) SP: 28,0 DP: 14,0	SIMD/ MIMD	L1: 32+32 кБ L2:256 кБ L3:8192 кБ	SP: <112 DP: <56	10 нс	14,9	32	i7–4770
Super Micro 5U	МПС		MIMD-Distributed memory	1–8	SP: 160	MIMD	<=256 GB	SP: <1280	100–200 нс	10	2ТБ	5086B-TRF
Т-Платформы	КЛ	МК		640	DP: 96	MIMD	8–48 ГБ	62·10 <sup>3</sup>	2,5 мкс	5	12 ТБ	СКИФ «Cyberia»
Т-Платформы V-Class [29]				5–10	DP: 300–320	MIMD	256 ГБ	3,2·10 <sup>3</sup>	1,07 мкс	1,25–5	2,56 ТБ	Суперкомпьютер РУДН
Т-Платформы T-Blade 2 [30]				5130	DP: 140	MIMD	24 ГБ	5·10 <sup>5</sup>	1,07 мкс	5	72,18 ТБ	Суперкомпьютер «Ломоносов»
BOINC				РС	1–2 млн	DP: 50–200	MIMD	в среднем 4 ГБ	>1·10 <sup>7</sup>	5–400 мс	10 <sup>-3</sup> – 1	–

SP – Single Precision (одинарная точность, 32 бит), DP – Double Precision (двойная точность, 64 бит), МК – мультикомпьютеры, МП – мультипроцессоры, CM – серверная модификация.

**Реализация параллельных вычислений в рамках программной платформы МГУА**

Диаграмма классов подсистем планирования (TASK) и управления памятью (MEM), полученная

в результате объектно-ориентированного анализа и проектирования [32], реализующая основу механизмов параллельных вычислений в рамках платформы МГУА, представлена на рис. 1.

cMemObject – это абстракция, отражающая понятие объекта, выделение и освобождение памяти для которого осуществляется менеджером памяти программной платформы (new (), delete ()). cMemPool – абстракция, объединяющая непосредственно хранилище свободной памяти и объектов cMemObject ( \_blocks), а также алгоритмы управления ими (менеджер памяти: allocate (), deallocate ()). Стоит отметить, что выделение памяти в данной реализации осуществляется относительно большими блоками cBlock (например, страницы памяти в МЯП и МПС – оптимизация работы на уровне операционной системы). Также предполагается группировка хранимых объектов по типу (например, расположение информации о структурах полиномиальных моделей последовательно в памяти в соответствии с порядком доступа из алгоритма), что потенциально увеличивает эффективность автоматических (МЯП, МПС) и ручных (ПП, КЛ, РС) механизмов управления кэшированием данных в локальной памяти вычислительного узла (пункт 3 требований).

cTask – абстракция вычислительной задачи. Объект класса конкретной вычислительной задачи (производный от интерфейса cTask), будучи созданным, содержит все необходимые данные для осуществления требуемых вычислений, а также

реализует алгоритм этих вычислений (например, задача обучения набора полиномиальных моделей на определенной части выборки данных). Реализация менеджера задач cTaskManager ответственна за поддержку иерархии вычислительных задач (каждая задача может делегировать часть вычислений дочерним задачам путем вызова) и за планирование и распределение вычислений по узлам параллельной системы (соответствует пункту 2 требований). При этом каждая вычислительная задача уведомляется о количестве выделенных ей узлов (nThreads) и на каждом узле запускается с уникальным идентификатором (exec (nThreads, id), где id=[0..nThreads-1]).

cThreadManager – вариант реализации менеджера задач для МЯП и МПС, предполагающий динамическое распределение иерархии (дерева) задач по активным потокам ( \_waiting, \_running), привязанным к аппаратным вычислительным узлам. cThread – абстракция вычислительного потока, способная принимать (SetTask ()) на выполнение (Run ()) задачу, назначаемую ей менеджером cThreadManager. cThreadStorage реализует централизованное хранилище потоков ( \_threads) для согласованной работы нескольких менеджеров задач.

В табл. 3 приведены особенности реализации вычислительных задач cTask для каждого вида па-

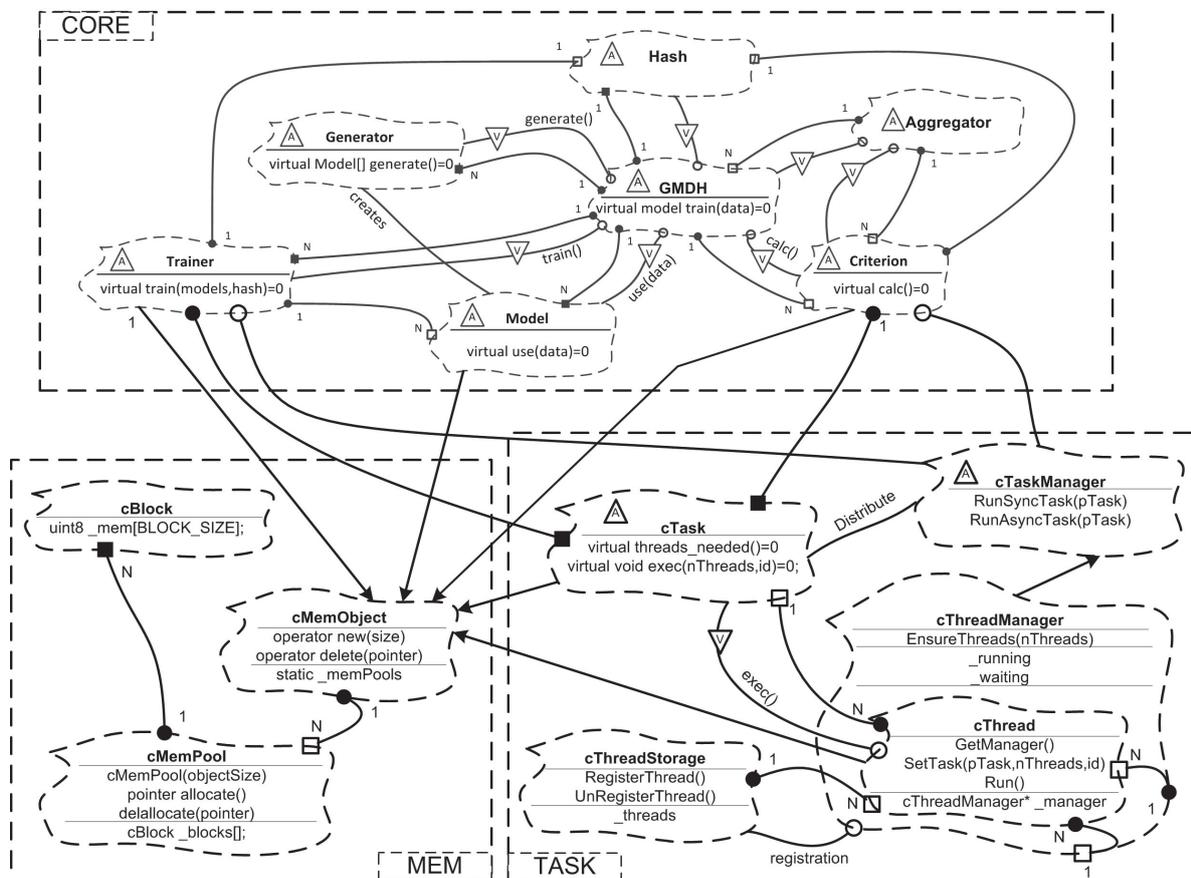


Рис. 1. Диаграмма классов подсистем управления задачами и памятью

параллельной архитектуры (в соответствии с пунктом 1 требований) – модель многомерной структуры данных для ПП, многопоточная модель для МЯП и МПС, клиент-серверная модель для КЛ и РС. Также для каждой реализации указаны базовая программная технология и способ передачи данных из разделяемой памяти системы в локальную память вычислительных узлов. Для поддержки запуска вычислительных задач с ожиданием завершения вычислений (для ПП, МЯП, МПС) в интерфейсе класса `sTaskManager` предусмотрен метод `RunSyncTask()`, а для поддержки запуска набора независимых вычислительных задач (серверная часть для КЛ и РС при обслуживании нескольких клиентов) представлен метод `RunAsyncTask()`.

Разработанная в работе [12] совокупность классов, отражающая взаимосвязи сущностей предметной области МГУА и позволяющая реализовывать известные алгоритмы, базисы, методы обучения и селекции моделей, представлена в виде подсистемы CORE и выделена пунктиром.

Организация процесса индуктивного моделирования осуществляется наследниками класса GMDH, реализующими алгоритмы метода. Объекты класса GMDH принимают на вход выборку данных (функция `train` с параметром `data`) и производят их обработку (с помощью `Nash`). Затем они производят генерацию (используя класс `Generator`), обучение (используя класс `Trainer`) и селекцию моделей класса `Model` заданного базиса согласно внешнему критерию или набору критериев (класс `Criterion`). Класс `Aggregator` реализует составные алгоритмы МГУА, принимая список используемых (вложенных) алгоритмов МГУА в качестве параметра

конструктора. Более подробное описание семантики абстракций подсистемы CORE и связей между ними дано автором в работе [12] и техническом описании [33].

Абстракции `Trainer` (метод `train()` – обучение группы моделей `Model`) и `Criterion` (метод `calc()` – расчет значений внешнего критерия) осуществляются распараллеливание вычислений путем создания реализаций абстрактного интерфейса задачи `sTask` и непосредственного вызова планировщика `sTaskManager` для организации процесса параллельных вычислений.

#### Экспериментальная проверка эффективности предложенной организации параллельных вычислений

Для проверки эффективности предлагаемого подхода к организации параллельных вычислений была проведена реализация подсистем управления задачами и памятью для МЯП (в соответствии с диаграммой классов, изображенной на рис. 1, и особенностей реализации, приведенных в табл. 3). Эксперименты проводились путем включения описанных выше подсистем планирования и управления памятью в состав программной платформы МГУА, используемой в качестве основы системы прогнозирования нестационарных временных рядов с использованием мета-обучения [35]. В качестве исходной информации для проведения индуктивного моделирования использовались данные предыстории нестационарного временного ряда обменного курса валют EUR/USD за 2009–2010 гг. – входная выборка данных размерности 3 (3 входных аргумента), состоящая из 100 точек. Для по-

Таблица 3. Особенности реализации задач для различных архитектур параллельной обработки данных

Вид архитектуры	Клиент	Сервер	Технология	Число потоков	Способ передачи данных
ПП	Реализация <code>sTask</code> для потоковых процессоров является однопоточной, так как предполагает централизованное формирование пакета данных, передаваемого в память потокового процессора для осуществления параллельных расчетов (выборка данных, описание структур и параметров моделей для обучения и/или селекции). При этом реализация ответственна за определение типа и серии потокового процессора для выбора подходящего ядра ( <code>kernel</code> – в терминологии OpenCL) код, производящий вычисления на стороне потокового процессора [34]). Так же реализация ожидает завершения вычислений и получает результаты из памяти потокового процессора, преобразуя в формат представления основной программы		OpenCL [34]	1	Память потокового процессора
МЯП	Многопоточная реализация алгоритмов обучения и селекции совокупности моделей производится путем разделения всего множества моделей на последовательные непересекающиеся части по числу потоков, участвующих в вычислениях. При этом процедура разделения может выполняться итеративно с целью балансировки загруженности потоков вычислениями		Стандартные инструменты синхронизации и работы с потоками многозадачных операционных систем	N	Память процесса
МПС	Реализация эквивалентна многоядерным процессорам за исключением необходимости кэширования данных в собственной памяти каждого из процессоров			N	Память процесса (копирование)
КЛ	Разделение множества моделей на непересекающиеся части для расчета на одном или нескольких серверах. Формирование пакета данных для передачи на сервер, ожидание результатов	Ожидание запроса клиента, запуск задачи обучения или селекции моделей (параллельной, если поддерживается), передача результатов	MPI	N	Сеть передачи данных
РС			TCP/IP	N	Локальная сеть/сеть Интернет

строения прогнозирующих моделей использовался комбинаторный алгоритм МГУА [13. С. 32–38], осуществляющий полный перебор полиномиальных моделей (полиномов) максимальной степени 3 (общее количество моделей составляло 1048575). Параметрическая идентификация моделей проводилась с использованием метода Гаусса (асимптотическая сложность  $O(n^3)$ ). В качестве внешнего критерия селекции моделей использовались критерий точности CR [1. С. 44] и критерий минимума смещения BS [1. С. 54]. Для обучения и селекции моделей выборка делилась на равные части по 50 точек. Для расчета значения CR каждая модель обучалась однократно на одной части, после чего с использованием данных второй части производился отбор 10 лучших моделей, каждая из которых обучалась дважды (на обеих частях выборки) для расчета BS. Эксперимент повторялся несколько раз для различного количества параллельных потоков вычислений (от 1 до 8). Измерялось время, затрачиваемое на вычисления, причем каждый эксперимент повторялся 10 раз с целью минимизации влияния на результаты случайных факторов, увеличивающих время расчета. Для проведения экспериментов использовались три различных аппаратных конфигурации МЯП. Вычисления на каждой из аппаратных конфигураций проводились с использованием вещественных чисел двойной точности (тип double), применялось выравнивание данных по границе, кратной размеру операнда (в соответствии с рекомендациями по оптимизации [15, 16]), векторизация вычислений осуществлялась с применением набора команд SSE2.

На рис. 2 представлены результаты проведенных экспериментов. По оси абсцисс – количество параллельных потоков вычислений  $P$ , по оси ординат – время вычисления  $t_p$ . Сплошными линиями и пометкой «64-» обозначены эксперименты, проводимые с использованием 64-битной версии исполняемых файлов, пунктирными линиями и меткой «32-» – 32-битной. Аппаратные конфигурации МЯП, соответствующие меткам «A6», «p2» и «i7», приведены в табл. 4. Стоит отметить, что 32-битная версия исполняемого файла показала меньшую производительность, чем 64-х битная. Это может быть объяснено наличием большего количества регистров общего назначения, доступных приложениям в программной модели AMD64 по сравнению с x86 [20. С. 1–8].

На рис. 3, а приведены графики прироста производительности  $\tau_p$  (ось ординат) в зависимости от числа потоков вычисления  $P$  (ось абсцисс) для различных аппаратных конфигураций. Наибольший прирост наблюдается для 6-ядерного процессора – в 3,96 раза. Что характерно, линейный характер увеличения производительности с ростом числа потоков исчезает при достижении количества аппаратно-доступных ядер.

На рис. 3, б приведены графики эффективности распараллеливания  $\eta_p$ . Видно, что при количестве

потоков вычисления, совпадающем с количеством аппаратных ядер, эффективность составляет 0,63–0,67 для всех конфигураций.

**Таблица 4.** Аппаратные конфигурации МЯП, использованные при проведении экспериментов

Метка графиков на рис. 2	Процессор	Память	Операционная система
p2	AMD Phenom II 960T, K10, 6 cores (4+2 unlocked), 3 ГГц	8GB, DDR3-1333, 9-9-9-24, 13 нс	Windows 7, 64 bit
i7	Intel Core i7-2600K, Sandy Bridge, 4 cores, HT, 3,4 ГГц	4GB, DDR3-1333, 9-9-9-24, 13 нс	Windows 7, 32 bit
A6	AMD A6-6400K, Richland/Piledriver, 2 cores, HD8470D/800МГц, 3,9 ГГц	4GB, DDR3-1600, 9-9-9-27, 15 нс	Windows 7, 64 bit

На рис. 4 приведены графики, отображающие время, затраченное каждым потоком вычисления на расчет определенной ему части общей вычислительной задачи. Каждый из графиков соответствует определенному числу потоков – от 2 до 8, причем подписи под осью абсцисс определяют индекс id вычислительного потока (условный номер вычислительного потока в диапазоне от 1 до числа максимального количества потоков). Высота столбцов пропорциональна затраченному времени (каждый из столбцов группы соответствует своей аппаратной конфигурации и битности исполняемого файла).

Видно, что распределение вычислительной нагрузки производится неравномерно – некоторые потоки (с меньшими индексами) остаются «недозагруженными» вычислениями, поэтому определенную часть времени простаивают в ожидании завершения вычислений на других потоках. Причиной этому являются неточности в предсказании времени обучения моделей в текущей реализации алгоритма распределения моделей по независимым группам. Увеличение точности предсказания является задачей дальнейших работ. Тем не менее, на основании текущих экспериментальных данных можно произвести оценку максимальной производительности предложенного решения. Минимальное общее время расчета соответствует равномерному распределению вычислительной нагрузки. В этом случае каждый поток затратит время, равное среднему измеренному времени работы потоков. Графики прироста производительности и эффективности прироста в этом случае для МЯП «p2» приведены на рис. 3 и помечены «ideal» – для 6 потоков прирост составит 5,77, а эффективность – 0,96, что соответствует лучшим показателям программных систем индуктивного моделирования, рассмотренным выше (табл. 1).

#### Заключение

Гибкость программной платформы МГУА, предложенной автором в работе [12], позволила без какого-либо изменения ее объектно-ориентиро-

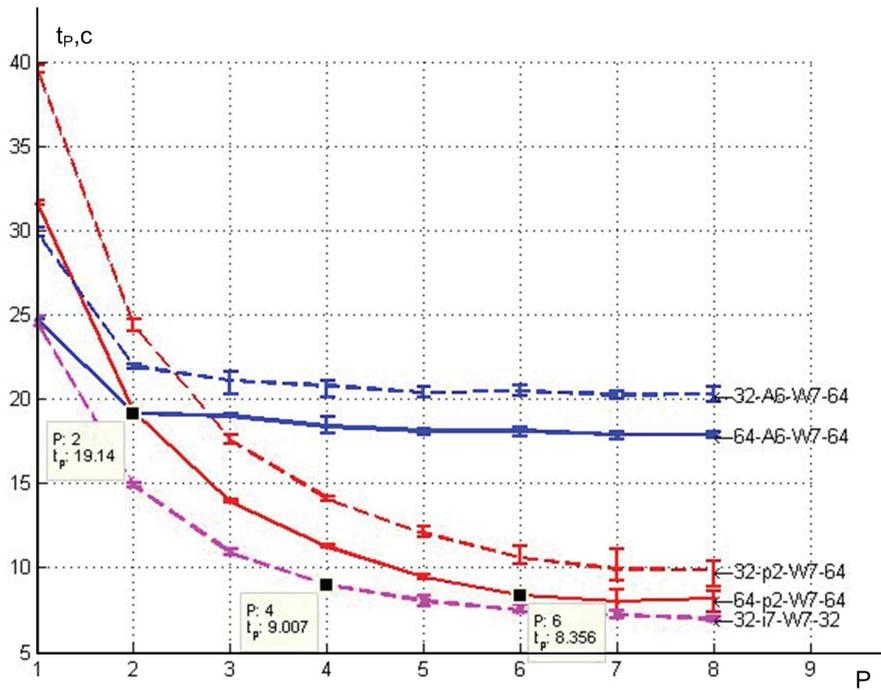


Рис. 2. Графики времени выполнения расчета  $t_p$  при различном количестве потоков вычислений  $P$  для различных аппаратных конфигураций МЯП

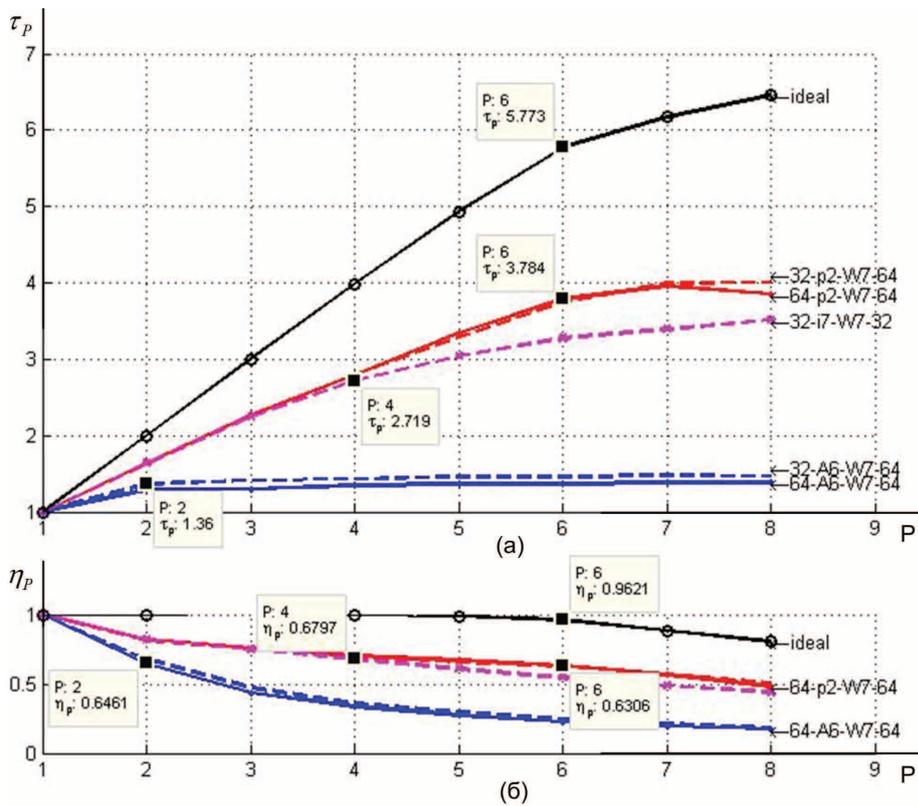


Рис. 3. Графики прироста производительности  $\tau_p$  (а) и эффективности распараллеливания  $\eta_p$  (б) при различном количестве потоков вычислений  $P$  для различных аппаратных конфигураций МЯП

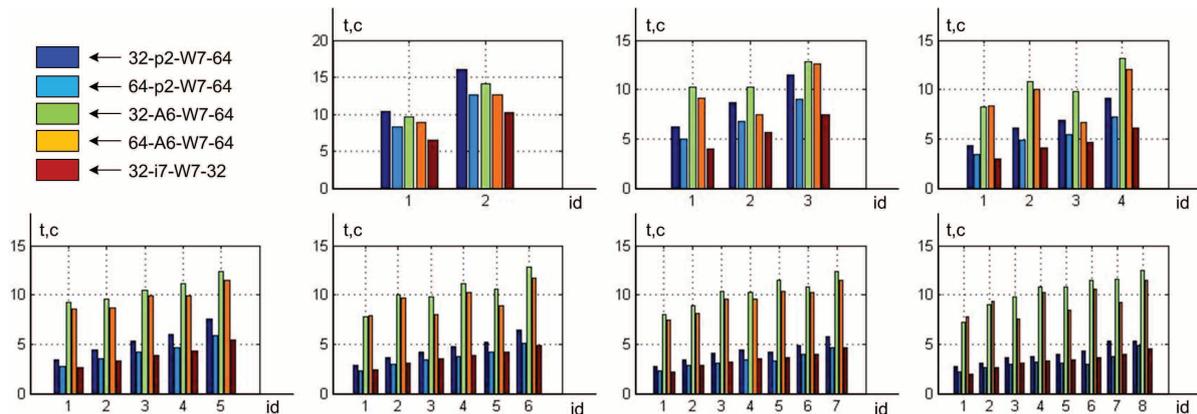


Рис. 4. Распределение времени выполнения расчетов по вычислительным потокам при различном их количестве

ванной структуры (архитектуры) реализовать в ее составе подсистемы параллельных вычислений и управления памятью, позволяющих увеличить производительность любого алгоритма МГУА, реализуемого на базе программной платформы. Экспериментально полученные значения прироста производительности и коэффициента распараллеливания для комбинаторного алгоритма МГУА для различных аппаратных конфигураций МЯП позволяют сделать вывод о том, что предложенная программная платформа МГУА удовлетворяет сформулированному требованию производительности. Направлением дальнейших работ является

увеличение точности предсказания времени обучения моделей в реализации для МЯП и МПС, а также перенос части вычислений на ПП.

*Работа выполнена в рамках Гос. задания Министерства Образования и Науки РФ на 2013 г. (проект № 7.2868.2011).*

*Автор выражает благодарность Анатолию Андраханову, сотруднику лаборатории Интеллектуальных Систем, Когнитивной Робототехники и Автоматизации (ИСКРА) кафедры Промышленной Электроники Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники, за ценные замечания в процессе подготовки рукописи статьи.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – Киев: Наукова Думка, 1982. – 296 с.
- Anastasaki L., Mort N. The development of self-organization techniques in modelling: A review of the Group Method of Data Handling (GMDH): Research Report № 813. – Sheffield, United Kingdom: The University of Sheffield, 2001. – 38 p.
- Ivakhnenko A.G., Ivakhnenko G.A. The Review of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling // International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis: Advanced in Mathematical Theory and Applications. – 1995. – V. 5. – № 4. – P. 527–535.
- GMDH – Examples of Applications // Group Method of Data Handling (GMDH). 2010. URL: [http://www.gmdh.net/GMDH\\_exa.htm](http://www.gmdh.net/GMDH_exa.htm) (дата обращения: 05.09.2013).
- Степашко В.С., Булгакова А.С. Обобщенный итерационный алгоритм метода группового учета аргументов // Управляющие системы и машины: Международный журнал. – 2013. – № 2. – С. 5–17.
- Muller J.A., Lemke F. Self-Organising Data Mining. An Intelligent Approach to Extract Knowledge from Data. – Dresden, Berlin: Books on Demand GmbH, 1999. – 225 p.
- Ivakhnenko A.G., Kovalishyn V.V., Tetko I.V., Luik A.I. et al. Self-Organization of Neural Networks with Active Neurons for Bioactivity of Chemical Compounds Forecasting by Analogues Complexing GMDH algorithm: Poster for the 9<sup>th</sup> International Conference on Neural Networks (ICANN 99). – Edinburg, 1999. – 13 p. URL: [http://www.gmdh.net/articles/papers/nn\\_anal.pdf](http://www.gmdh.net/articles/papers/nn_anal.pdf) (дата обращения: 05.09.2013).
- Kordik P. Fully Automated Knowledge Extraction using Group of Adaptive Models Evolution: PhD thesis. – Prague, 2006. – 136 p.
- GMDH Shell – Forecasting Software for Professionals. Прикладная программа. URL: <http://www.gmdhshell.com> (дата обращения: 05.09.2013).
- Степашко В.С. Основные требования к функциональной структуре ППП МГУА для персональных ЭВМ // Управление в технических системах. – Киев: ИК АН УССР, 1990. – С. 27–34.
- Genetic Design of GMDH-type Neural Networks for Modelling of Thermodynamically Pareto Optimized Turbojet Engines / K. Atashkari, N. Nariman-zadeh, A. Darvizeh, X. Yao, A. Jamali, A. Pilechi // WSEAS Transactions on COMPUTERS. – 2004. – V. 3. – Iss. 3. – P. 177–183.
- Орлов А.А. Принципы построения архитектуры программной платформы для реализации алгоритмов метода группового учета аргументов (МГУА) // Управляющие системы и машины: Международный журнал. – 2013. – № 2. – С. 65–71.
- Madala H.R., Ivakhnenko A.G. Inductive Learning Algorithms for Complex System Modeling. – Boca Raton; Ann Arbor; London; Tokyo: CRC Press, 1994. – 368 p.
- Koshulko O.A., Koshulko A.I. Adaptive parallel implementation of the Combinatorial GMDH algorithm // Proceedings of International Workshop on Inductive Modelling (IWIM-2007). – Prague, 2007. – P. 71–77.
- Software Optimization Guide for AMD Family 15h Processors. V. 3.06. Advanced Micro Devices (AMD). – 2012. – 362 c. URL: [http://support.amd.com/us/Processor\\_TechDocs/47414\\_15h\\_sw\\_opt\\_guide.pdf](http://support.amd.com/us/Processor_TechDocs/47414_15h_sw_opt_guide.pdf) (дата обращения: 05.09.2013).
- Intel® 64 and IA-32 Architectures. Optimization Reference Manual: справочное руководство. V. 3.06. Intel Corporation. – 2013. – 670 c. URL: <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/manuals/64-ia-32-architectures-optimization-manual.pdf> (дата обращения: 05.09.2013).

17. Kordik P., Spirk J., Simecek I. Parallel computing of GAME models // Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2008). – Kyiv, 2008. – P. 160–163.
18. Lemke F. Parallel Self-organizing Modeling // Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2008). – Kyiv, 2008. – P. 176–183.
19. Koshulko O.A., Koshulko A.I. Acceleration of GMDH combinatorial search with HPC clusters // Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2008). – Kyiv, 2008. – P. 164–167.
20. AMD64 Technology. AMD64 Architecture. В 5 ч. Ч. 1. Application Programming. V. 3.20. Advanced Micro Devices (AMD). – 2013. – 386 с. URL: [http://support.amd.com/us/Processor\\_TechDocs/24592\\_APM\\_v1.pdf](http://support.amd.com/us/Processor_TechDocs/24592_APM_v1.pdf) (дата обращения: 05.09.2013).
21. TOP500. List Statistics. Process generation category. June 2013 (статистика по поколениям процессоров, использованных в суперкомпьютерах списка Top 500). – TOP500 Supercomputers. 2013. URL: <http://www.top500.org/statistics/list/> (дата обращения: 05.09.2013).
22. Таненбаум Э., М. ван Стеен. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. – СПб.: Питер, 2003. – 887 с.
23. Duncan R. A survey of parallel computer architectures // Computer: Journal of IEEE. – 1990. – V. 23. – Iss. 2. – P. 5–16.
24. Flynn M.J. Very High-Speed Computing Systems // Proceedings of the IEEE. – 1966. – V. 54. – P. 1901–1909.
25. AMD Graphics Cores Next (GCN) architecture: техническое описание. V. 1.0. Advanced Micro Devices Inc. – 2012. – 18 с. URL: [http://www.amd.com/us/Documents/GCN\\_Architecture\\_whiterpaper.pdf](http://www.amd.com/us/Documents/GCN_Architecture_whiterpaper.pdf) (дата обращения: 05.09.2013).
26. NVIDIA GeForce GTX 680: техническое описание. V. 1.0. NVIDIA. – 2012. – 29 с. URL: [http://international.download.nvidia.com/webassets/en\\_US/pdf/GeForce-GTX-680-Whiterpaper-FINAL.pdf](http://international.download.nvidia.com/webassets/en_US/pdf/GeForce-GTX-680-Whiterpaper-FINAL.pdf) (дата обращения: 05.09.2013).
27. Chrysos G. Intel Xeon Phi Coprocessor – the Architecture: техническое описание. Intel Corporation. 2012. URL: <http://software.intel.com/en-us/articles/intel-xeon-phi-coprocessor-codename-knights-corner> (дата обращения: 05.09.2013).
28. Software Optimization Guide for AMD Family 10h and 12h Processors. V. 3.13. Advanced Micro Devices (AMD). – 2011. – 348 с. URL: [http://support.amd.com/us/Processor\\_TechDocs/40546.pdf](http://support.amd.com/us/Processor_TechDocs/40546.pdf) (дата обращения: 05.09.2013).
29. Семейство T-Blade V-Class. Обзор вычислительных модулей V205S и V205F. T-Платформы. – 2012. – 24 с. URL: [http://www.t-platforms.ru/images/pdfvclass\\_v5000\\_RUS/Обзор\\_вычислительных\\_модулей\\_V205S\\_и\\_V205F.pdf](http://www.t-platforms.ru/images/pdfvclass_v5000_RUS/Обзор_вычислительных_модулей_V205S_и_V205F.pdf) (дата обращения: 05.09.2013).
30. T-Blade 2: техническое руководство. Rev. A02. T-Платформы. – 2010. – 24 с. URL: [http://www.t-platforms.ru/images/pdfblade2\\_products\\_RUS/TB2\\_Техническое\\_руководство.pdf](http://www.t-platforms.ru/images/pdfblade2_products_RUS/TB2_Техническое_руководство.pdf) (дата обращения: 05.09.2013).
31. Таненбаум Э. Современные операционные системы. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 1120 с.
32. Object-Oriented Analysis and Design with Applications / G. Booch, R.A. Maksimchuk, M.W. Engel, B.J. Young, J. Conallen, K.A. Houston. 3<sup>d</sup> ed. – NY: Addison-Wesley Professional, 2007. – 720 p.
33. Орлов А.А. Электронный информационный образовательный ресурс: <Программная платформа для реализации метода группового учета аргументов> // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов <Наука и образование>. – 2013. – № 2. URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2013/2.doc> (дата обращения: 05.09.2013).
34. The OpenCL Specification / под ред. А. Munshi. Ver. 1.2., Rev. 19. Khronos OpenCL Working Group. – 2012. – 380 p. URL: <http://www.khronos.org/registry/cl/specs/opencl-1.2.pdf> (дата обращения: 05.09.2013).
35. Orlov A.A. Non-Stationary Time Series Forecasting on Basis of Analysis and Prediction of Forecasting Models Efficiency // Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2013). – Kyiv, 2013. – P. 192–199.

*Поступила 11.09.2013 г.*

UDC 004.41[2+4+5]:004.272::004.855

## INCREASING THE PERFORMANCE OF THE SOFTWARE FRAMEWORK FOR IMPLEMENTING THE ALGORITHMS OF THE GROUP METHOD OF DATA HANDLING

A.A. Orlov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

*In previous works the author has proposed a universal software framework that allows implementing the known algorithms of group method of data handling, model bases, training methods and model selection criteria. This paper introduces the solution of a topical problem of increasing the performance of the framework. Based on the review of existing computing architectures for parallel data processing and software systems for inductive modeling supporting parallel computations the author has worked out the requirements for the subsystems of parallel computing and memory management of the software framework. Using the methodology of object-oriented analysis and design the author developed the object-oriented structure of these subsystems and introduced the specifics of their operation on each of the mentioned computing architectures. The performance of the parallel implementation of the combinatorial group method of data handling algorithm on basis of the software framework was evaluated experimentally for multi-core processors.*

### **Key words:**

*Software framework, object-oriented analysis and design, parallel data processing, efficiency of paralleling, group method of data handling.*

## REFERENCES

1. Ivakhnenko A.G. *Induktivnyy metod samoorganizatsii modeley slozhnykh system* [Inductive method of self-organization of models of complex systems]. Kiev, Naukova Dumka, 1982. 296 p.
2. Anastasakis L., Mort N. *The development of self-organization techniques in modelling: A review of the Group Method of Data Handling (GMDH): Research Report № 813*. Sheffield, United Kingdom, The University of Sheffield, 2001. 38 p.
3. Ivakhnenko A.G., Ivakhnenko G.A. The Review of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling. *International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis: Advanced in Mathematical Theory and Applications*, 1995, vol. 5, no. 4, pp. 527–535.
4. *GMDH – Examples of Applications*. Group Method of Data Handling (GMDH). 2010. Available at: [http://www.gmdh.net/GMDH\\_exa.htm](http://www.gmdh.net/GMDH_exa.htm) (accessed 05 September 2013).
5. Stepashko V.S., Bulgakova A.S. Obobshchennyye iteratsionnyy algoritmy metoda gruppovogo ucheta argumentov [Generalized iterative algorithm of group method of data handling]. *Control Systems and Computers: International Journal*, 2013, no. 2, pp. 5–17.
6. Muller J.A., Lemke F. *Self-Organising Data Mining. An Intelligent Approach to Extract Knowledge from Data*. Dresden, Berlin, Books on Demand GmbH, 1999. 225 p.
7. Ivakhnenko A.G., Kovalishyn V.V., Tetko I.V., Luik A.I. Self-Organization of Neural Networks with Active Neurons for Bioactivity of Chemical Compounds Forecasting by Analogues Complexing GMDH algorithm. *Poster for the 9th International Conference on Neural Networks (ICANN 99)*. Edinburg, 1999. 13 p. Available at: [http://www.gmdh.net/articles/papers/nn\\_anal.pdf](http://www.gmdh.net/articles/papers/nn_anal.pdf) (accessed 05 September 2013).
8. Kordik P. *Fully Automated Knowledge Extraction using Group of Adaptive Models Evolution: PhD thesis*. Prague, 2006. 136 p.
9. *GMDH Shell – Forecasting Software for Professionals*. Application program. Available at: <http://www.gmdhshell.com> (accessed 05 September 2013).
10. Stepashko V.S. Osnovnye trebovaniya k funktsionalnoy strukture PPP MGUA dlya personalnykh JeVM [Basic requirements for functional structure of GMDH software package for Personal Computers]. *Upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh*. Kiev, IK AN USSR, 1990. pp. 27–34.
11. Atashkari K., Nariman-zadeh N., Darvizeh A., Yao X., Jamali A., Pilechi A. Genetic Design of GMDH-type Neural Networks for Modelling of Thermodynamically Pareto Optimized Turbojet Engines. *WSEAS Transactions on COMPUTERS*, 2004, vol. 3, Iss. 3, pp. 177–183.
12. Orlov A.A. Printsipy postroeniya arkhitektury programmnoy platformy dlya realizatsii algoritmov metoda gruppovogo ucheta argumentov (MGUA) [Principles of construction of the software framework architecture for implementation of the algorithms of group method of data handling (GMDH)]. *Control Systems and Computers: International Journal*, 2013, no. 2, pp. 65–71.
13. Madala H.R., Ivakhnenko A.G. *Inductive Learning Algorithms for Complex System Modeling*. Boca Raton; Ann Arbor; London; Tokyo: CRC Press, 1994. 368 p.
14. Koshulko O.A., Koshulko A.I. Adaptive parallel implementation of the Combinatorial GMDH algorithm. *Proc. International Workshop on Inductive Modelling (IWIM-2007)*, Prague, 2007, pp. 71–77.
15. *Software Optimization Guide for AMD Family 15h Processors. V. 3.06. Advanced Micro Devices (AMD)*. 2012, 362 p. Available at: [http://support.amd.com/us/Processor\\_TechDocs/47414\\_15h\\_sw\\_opt\\_guide.pdf](http://support.amd.com/us/Processor_TechDocs/47414_15h_sw_opt_guide.pdf) (accessed 05 September 2013).
16. *Intel® 64 and IA-32 Architectures. Optimization Reference Manual*. Vol. 3.06. Intel Corporation, 2013, 670 p. Available at: <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/manuals/64-ia-32-architectures-optimization-manual.pdf> (accessed 05 September 2013).
17. Kordik P., Spirk J., Simecek I. Parallel computing of GAME models. *Proc. the 2nd International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2008)*. Kyiv, 2008. pp. 160–163.
18. Lemke F. Parallel Self-organizing Modeling. *Proc. the 2nd International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2008)*. Kyiv, 2008, pp. 176–183.
19. Koshulko O.A., Koshulko A.I. Acceleration of GMDH combinatorial search with HPC clusters. *Proc. the 2nd International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2008)*. Kyiv, 2008, pp. 164–167.
20. *AMD64 Technology. AMD64 Architecture*. Vol. 5 ch. Ch. 1. Application Programming. Vol. 3.20. Advanced Micro Devices (AMD). 2013. 386 p. Available at: [http://support.amd.com/us/Processor\\_TechDocs/24592\\_APM\\_v1.pdf](http://support.amd.com/us/Processor_TechDocs/24592_APM_v1.pdf) (accessed 05 September 2013).
21. *TOP500. List Statistics. Process generation category*. June 2013: (statistics on processor generations used in supercomputers from the Top500 list). – TOP500 Supercomputers. 2013. Available at: <http://www.top500.org/statistics/list/> (accessed 05 September 2013).
22. Tanenbaum E., M. van Steen. *Raspredelelynye sistemy. Printsipy i paradigmy* [Distributed Systems: Principles and Paradigms]. Saint Petersburg, Piter, 2003. 887 p.
23. Duncan R. A survey of parallel computer architectures. *Computer: Journal of IEEE*, 1990, vol. 23, Iss. 2, pp. 5–16.
24. Flynn M.J. Very High-Speed Computing Systems. *Proc. the IEEE*, 1966, vol. 54, pp. 1901–1909.
25. *AMD Graphics Cores Next (GCN) architecture. V. 1.0. Advanced Micro Devices Inc.* 2012. 18 p. Available at: [http://www.amd.com/us/Documents/GCN\\_Architecture\\_whitepaper.pdf](http://www.amd.com/us/Documents/GCN_Architecture_whitepaper.pdf) (accessed 05 September 2013).
26. *NVIDIA GeForce GTX 680. V.1.0. NVIDIA*. 2012. 29 p. Available at: [http://international.download.nvidia.com/webassets/en\\_US/pdf/GeForce-GTX-680-Whitepaper-FINAL.pdf](http://international.download.nvidia.com/webassets/en_US/pdf/GeForce-GTX-680-Whitepaper-FINAL.pdf) (accessed 05 September 2013).
27. Chrysos G. *Intel Xeon Phi Coprocessor – the Architecture*. Intel Corporation. 2012. Available at: <http://software.intel.com/en-us/articles/intel-xeon-phi-coprocessor-codename-knights-corner> (accessed 05 September 2013).
28. *Software Optimization Guide for AMD Family 10h and 12h Processors. V.3.13*. Advanced Micro Devices (AMD). 2011. 348 p. Available at: [http://support.amd.com/us/Processor\\_TechDocs/40546.pdf](http://support.amd.com/us/Processor_TechDocs/40546.pdf) (accessed 05 September 2013).
29. *Semeystvo T-Blade V-Class. Obzor vychislitelnykh moduley V205S i V205F. T-Platformy* [Review of computation units V205S and V205F. T-Platforms]. 2012. 24 p. Available at: [http://www.t-platforms.ru/images/pdfvclass\\_v5000\\_RUS/Obzor\\_vychislitelnykh\\_module\\_V205S\\_i\\_V205F.pdf](http://www.t-platforms.ru/images/pdfvclass_v5000_RUS/Obzor_vychislitelnykh_module_V205S_i_V205F.pdf) (accessed 05 September 2013).
30. *T-Blade 2. Rev.A02. T-Platforms*. 2010. 24 p. Available at: [http://www.t-platforms.ru/images/pdfblade2\\_products\\_RUS/TB2\\_Tehnicheskoe\\_rukovodstvo.pdf](http://www.t-platforms.ru/images/pdfblade2_products_RUS/TB2_Tehnicheskoe_rukovodstvo.pdf) (accessed 05 September 2013).
31. Tanenbaum E. *Sovremennyye operatsionnyye sistemy* [Modern Operating Systems]. Saint Petersburg, Piter, 2010. 1120 p.
32. Booch G., Maksimchuk R.A., Engel M.W., Young B.J., Conallen J., Houston K.A. *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*. NY, Addison-Wesley Professional, 2007. 720 p.
33. Orlov A.A. Elektronnyy informatsionnyy obrazovatelnyy resurs <Programmnyaya platforma dlya realizatsii metoda gruppovogo ucheta argumentov> [Electronic informational educational resource <Software platform for implementation of algorithms of group method of data handling (GMDH)>]. *Hroniki obedinennogo fonda elektronnykh resursov <Nauka i obrazovanie>* [Chronicles of the united fund of electronic resources <Science and Education>], 2013, no. 2. Available at: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2013/2.doc> (accessed 05 September 2013).
34. Munshi A. *The OpenCL Specification*. Ver.1.2., Rev.19. Khronos OpenCL Working Group. 2012. 380 p. Available at: <http://www.khronos.org/registry/cl/specs/opencl-1.2.pdf> (accessed 05 September 2013).
35. Orlov A.A. Non-Stationary Time Series Forecasting on Basis of Analysis and Prediction of Forecasting Models Efficiency. *Proc. the 4th International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2013)*. Kyiv, 2013. pp. 192–199.

УДК 519.854.3

## ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО ЧИСЛА СТАНЦИЙ ДЛЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ТЕРМИНАЛЬНЫХ ТОЧЕК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Ал.В. Погребной

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

**Актуальность исследования** обусловлена широким распространением распределенных систем реального времени и необходимостью разработки методов автоматизированного проектирования таких систем.

**Целью работы** является разработка метода определения минимального числа станций компьютерной сети, способных подключить заданное множество терминальных точек объекта управления.

**Методы исследования** используют достижения в области линейного программирования с целочисленными и булевыми переменными.

**Результаты исследования.** Задача выбора минимального числа станций, способных подключить заданную совокупность терминальных точек объекта управления, сформулирована как задача целочисленного линейного программирования. Выделены особенности, которыми обладает данная задача для рассматриваемой области применения. Учитывая эти особенности, разработан метод, который является более эффективным в сравнении с существующими методами решения задач целочисленного программирования. Метод позволяет локализовать поиск оптимального решения среди вершин единичного гиперкуба, используя для этой цели процедуру симплекс-метода.

### Ключевые слова:

Задача целочисленного линейного программирования, задача целочисленного покрытия, задача булевого покрытия, симплекс-метод.

### Исходные пояснения к задаче

Рассматривается одна из задач, возникающих при проектировании систем управления объектами с территориально распределенным оборудованием. В этих условиях современные вычислительные системы, выполняющие системные и прикладные функции управления, как правило, реализуются на основе типовых станций (контроллеров), объединенных в локальную сеть. План территории, на которой располагается оборудование объекта и системы управления, именуется топологическим полем [1]. Система управления связана с объектом через датчики, исполнительные механизмы и другие источники и приемники информации. Это могут быть и любые другие устройства для приема и передачи данных от операторов, других систем, приборов наблюдения и сигнализации и т. п. Все такие источники и потребители информации будем именовать терминальными точками.

Таким образом, система управления в конечном итоге связывается с объектом через терминальные точки. На рис. 1 приведена схема связи между терминальными точками (ТТ) и входами (выходами) системных и прикладных функций через станцию вычислительной системы. Совокупность терминальных точек на рис. 1 выделена пунктирной линией. Станция (С) представлена совокупностью мест для подключения точек, аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП). Системные и прикладные функции представлены в станции условно одним модулем, обозначенным как ПФ, с одним входом (Вх) и одним выходом (Вых).

Приведенное на рис. 1 изображение схемы связи во многом является условным. В частности, модули и данные ПФ могут быть размещены на раз-

ные станции. Например, вход ПФ размещен в станции С, а выход оказался в другой станции С<sub>1</sub>. В этом случае связь между выходом ПФ и ЦАП осуществляется по сети, т. е. через адаптер подключения станции С<sub>1</sub> к магистрали и далее по одной или нескольким магистралям сети к адаптеру подключения станции С. На рис. 1 не отображено и то, что ТТ могут подключаться к станциям через коммутаторы устройств связи с объектом. Все эти уточнения здесь опущены, т. к. они не оказывают влияния на разработку метода решения рассматриваемой задачи.

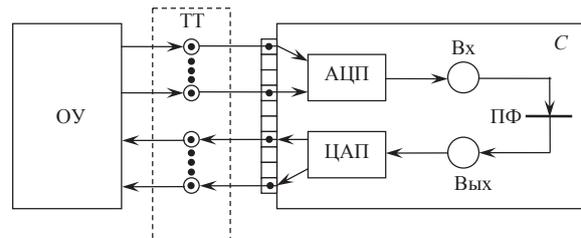


Рис. 1. Схема связи терминальных точек с входами и выходами системных и прикладных функций

При решении задачи определения минимального числа станций, способных подключить терминальные точки системы управления, необходимо различать их по типам. Так, принадлежность точек к группам источников и приемников информации уже делит их на два типа. Кроме того, точки различаются между собой и по другим основаниям, связанным, например, с разнообразием физических параметров входных и выходных сигналов и данных.

В свою очередь станции также различаются по видам. Для решения рассматриваемой задачи важным является то, что каждая станция способна

подключить ограниченное количество точек определенного типа. Совокупность типов точек и места (порты) их подключения в станциях стандартизованы. Взаимозаменяемость между портами разных типов не допускается, поэтому точка определенного типа может быть подключена к станции только через порт соответствующего типа. Принимается также, что к одному порту может быть подключена только одна точка. Подключение точек к станциям через коммутаторы здесь не рассматривается.

Предполагается также, что номенклатура видов станций, которые могут быть использованы при проектировании системы управления, задана. Для нашей задачи в этой номенклатуре одна станция отличается от другой лишь числом портов каждого типа. Очевидно, что такое допущение является достаточно грубым и может быть оправдано для станций технологического назначения, к которым непосредственно подключаются терминальные точки объекта управления.

Операторские и системные станции по составу оборудования и стоимости могут существенно отличаться от технологических. Включение таких станций в вычислительную систему часто осуществляется независимо от решения задачи выбора числа станций. Размещение операторских станций на топологическом поле, как правило, предопределено техническим заданием. Подключаемые к ним точки также во многом предопределены. На топологическом поле такие точки не указываются и при решении задачи не учитываются.

**Постановка задачи определения числа станций**

На содержательном уровне задача формулируется очень просто. Имеется совокупность точек топологического поля и задана номенклатура видов станций, которые можно использовать при проектировании системы управления. Для каждой станции известна совокупность типов портов для подключения точек. Требуется выбрать минимальное число станций из этой номенклатуры, которое обеспечивает возможность подключения всех точек.

Данная формулировка задачи иллюстрируется на рис. 2. Топологическое поле представлено множеством из 25 точек 4-х типов. Множество точек показано кружками, внутри которых представлены типы: первые 6 точек 1-го типа, далее 8 точек 2-го типа, 5 точек 3-го типа и 6 точек 4-го типа.

В верхней части рис. 2 приведен набор из 5 видов станций  $C_1, \dots, C_5$ , отличающихся совокупностями типов портов. Данные виды представляют всю номенклатуру станций, доступных разработчику проекта при выборе станций для подключения точек. Ниже на рис. 2 приведен один из допустимых вариантов выбора станций. В этом варианте для подключения точек используется 7 станций: 2 станции  $C_2$ , 3 станции  $C_4$  и 2 станции  $C_5$ . Станции  $C_1$  и  $C_3$  в этом варианте оказались невостребованными. Подключение точек к соответствующим типам портов выбранных станций показано линиями связи. При этом избыточными (невостребованными) в данном варианте оказались 5 портов. На рис. 2 они отмечены штриховкой.

В нижней части рис. 2 приведен второй допустимый вариант выбора станций и также линиями связи показано подключение точек к портам этих станций. Данный вариант содержит 6 станций: 2 станции  $C_1$ , 1 станция  $C_3$ , 3 станции  $C_5$ . Избыточными в этом варианте оказались 2 порта 3-го типа в станциях  $C_5$ . Оба варианта являются допустимыми, т. к. подключаются все точки и в то же время ни одна из станций не может быть исключена. Это означает, что как бы мы не пытались перераспределить подключение точек к станциям варианта, ни одна из них не окажется избыточной по всем портам.

Заметим, что второй вариант, содержащий 6 станций, является оптимальным решением для данной задачи, т. к. содержит всего 2 избыточных порта, а любая станция набора включает не менее 4-х портов. В частности, первый вариант содержал 5 избыточных портов, что свидетельствовало о потенциальной возможности использовать для подключения точек на одну станцию меньше. Из этого не следует, что такая возможность обязательно бу-

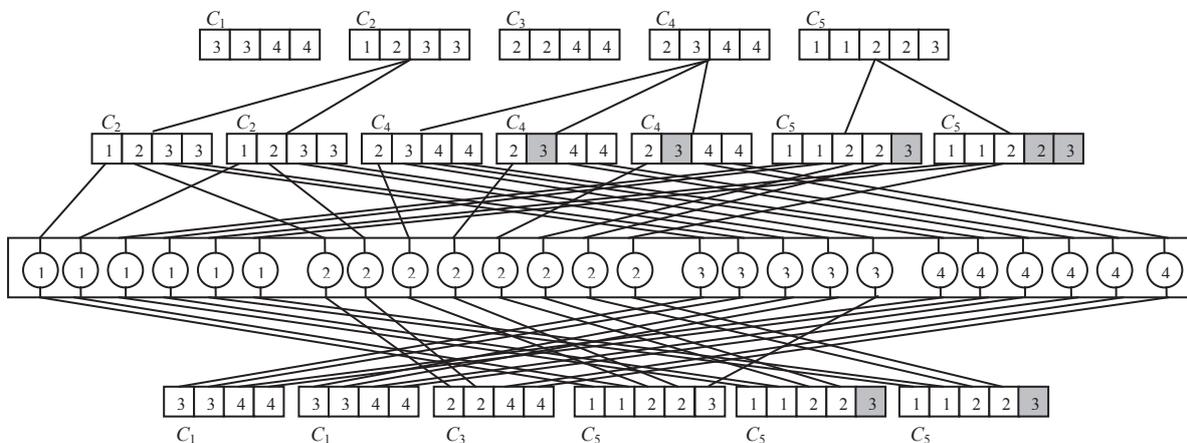


Рис. 2. Иллюстрация к формулировке задачи

дет найдена, но в данном случае второй вариант подтвердил наличие такой возможности.

Представим рассматриваемый пример задачи в другом виде. Составим матрицу, которая описывает набор станций. Строки матрицы соответствуют типам портов, а столбцы – станциям  $C_1, \dots, C_5$  набора. Для нашего примера матрица имеет вид, приведенный на рис. 3.

		$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	
Типы портов	1		1			2	Число точек поля
	2		1	2	1	2	
	3	2	2		1	1	
	4	2		2	2		
Вариант 1		2		3	2		
Вариант 2	2		1			3	

Рис. 3. Пример матричного представления задачи

Элементы столбца матрицы равны числу портов соответствующего типа в станции. Элементы строк матрицы указывают на число портов данного типа в станциях набора. Пустые клетки матрицы соответствуют нулевым элементам. Справа от матрицы приведен вектор числа точек топологического поля. В нижней части рис. 3 показаны векторы выбранных ранее вариантов решений, содержащих по 7 и 6 станций.

По рис. 3 легко установить, что оба варианта являются решениями задачи. Для проверки этого достаточно просуммировать перемножение элементов вектора варианта и векторов строк матрицы и убедиться, что полученные суммы по каждой строке равны или превышают число точек топологического поля соответствующего типа. Например, если вектор 1-го варианта перемножить на вторую строку, то получим сумму  $2 \cdot 1 + 3 \cdot 1 + 2 \cdot 2 = 9$ , которая превышает число точек 2-го типа, равное 8.

От матричного представления задачи, приведенного на рис. 3, легко перейти к формализованной постановке задачи. Общую совокупность терминальных точек топологического поля обозначим множеством  $E$ ,

$$E = \cup E_r, \cap E_r = \emptyset, |E_r| = b_r, B = \{b_r\}, r = 1, 2, \dots, R,$$

где  $E_r$  – подмножество точек  $r$ -го типа в множестве  $E$ ;  $R$  – число типов точек на топологическом поле;  $b_r$  – число точек  $r$ -го типа в множестве  $E$ ;  $B$  – вектор числа точек топологического поля.

Для нашего примера  $|E|=25$ ,  $R=4$ , а вектор  $B=(6, 8, 5, 6)$ .

Число видов станций в заданном наборе обозначим величиной  $V$ . Для каждой станции  $C_v, v=1, 2, \dots, V$ , из набора введем вектор подключения точек

$$A_v = \{a_{rv}\}, r = 1, 2, \dots, R, v = 1, 2, \dots, V,$$

где  $a_{rv}$  – число портов  $r$ -го типа в станции  $v$ -го вида  $C_v$ . В примере  $V=5$ , а вектор  $A_1=(0, 0, 2, 2)$ ,  $A_2=(1, 1, 2, 0), \dots, A_5=(2, 2, 1, 0)$ .

Способность станций набора подключать терминальные точки согласно векторам  $A_v$  представим матрицей  $A, A = \|a_{rv}\|_{R \times V}$ . Для нашего примера

матрица  $A$  соответствует матрице описания набора станций, представленной на рис. 3.

Введем переменную  $x_v, v=1, 2, \dots, V$ , которая определяет число станций  $v$ -го вида, выбранных из набора, для подключения точек множества  $E$ . Тогда задачу определения минимального суммарного числа станций, необходимых для подключения всех точек множества  $E$ , можно записать в виде:

$$\sum_{v=1}^V x_v \Rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\sum_{v=1}^V a_{rv} x_v \geq b_r, r = 1, 2, \dots, R; \quad (2)$$

$x_v$  – целое положительное число для всех  $v=1, 2, \dots, V$ . (3)

Задача (1)–(3) относится к классу задач целочисленного линейного программирования [2]. Известно, что методы решения задач данного класса требуют больших объемов вычислений. Для рассматриваемого применения задача имеет ряд специфических особенностей. Все станции набора принимаются равноценными, поэтому целевая функция имеет вид (1), т. е. располагается симметрично относительно начала координат. Если станции требуется различать, например, по стоимости, тогда с учетом цены (веса)  $g_v$  станции  $C_v$ , целевая функция (1) будет иметь вид:

$$\sum_{v=1}^V g_v x_v \Rightarrow \min. \quad (4)$$

Другая специфика заключается в том, что в ограничении (2) величины  $a_{rv}$  и  $b_r$  для нашей задачи всегда целые положительные числа. Это не является дополнительным ограничением, а вытекает автоматически из смыслового содержания данных величин. Действительно, дробное или отрицательное число портов и точек не имеет смысла. В этих условиях все гиперплоскости, соответствующие ограничениям (2), имеют положительный наклон, а область допустимых решений расположена в положительной части пространства, определяемого переменными  $x_v$ .

Благодаря этой специфике данную задачу будем именовать задачей целочисленного покрытия. Заметим, что независимо от используемой целевой функции в виде (1) или (4) задача остается задачей покрытия. Термин «целочисленное покрытие» отражает сущность задачи, в которой некоторое множество элементов разного типа нужно получить в виде композиции подмножеств этих элементов из заранее заданной совокупности. Для нашего примера задачу можно представить как задачу покрытия множества терминальных точек  $E$ , заданного вектором  $B=\{b_r\}$ , совокупностью векторов подключения станций  $A_v=\{a_{rv}\}$ . Как будет показано в следующем разделе, названные особенности задачи дают возможность разработать более эффективный метод ее решения.

В результате решения задачи (1)–(3) получим вектор  $X^*=\{x_v^*\}, v=1, 2, \dots, V$ , компоненты  $x_v^*$  которого определяют минимальное число станций  $v$ -го

вида, необходимых для подключения терминальных точек множества  $E$ . Вектор  $X^*$  является оптимальным решением, т. е. соответствует минимальному суммарному числу станций. Приведенные на рис. 3 варианты соответствуют решениям  $X_1=(0,2,0,3,2)$  и  $X_2=(2,0,1,0,3)$ . При этом решение  $X_2=X^*$ , содержащее 6 станций, является оптимальным, т. к. с помощью 5 станций в данном примере нет возможности покрыть 25 точек ( $6+8+5+6=25$ ). Легко видеть, что 25 портов содержит только совокупность из 5 станций  $C_3$ , но эта совокупность не покрывает 6 точек 4-го типа (элемент  $b_4=6$  в векторе  $B$ ). Любая другая совокупность из 5 станций не содержит в сумме 25 портов и не может покрыть все терминальные точки.

**Метод решения задачи целочисленного покрытия**

Поиск оптимального решения задачи (1)–(3) с помощью известных методов решения задач целочисленного линейного программирования требует больших объемов вычислений [3], поэтому вполне естественным является стремление сократить объем вычислений за счет использования специфики задачи покрытия. Предварительно отметим, что попытка решить задачу покрытия без учета условия целочисленности с последующим округлением полученных значений переменных в данном случае не проходит. Действительно, решение задачи (1), (2) с помощью алгоритмов симплекса не вызывает затруднений, но округление можно использовать при больших значениях переменных (десятки и сотни), иначе будет большая погрешность. В нашем случае число станций велико и использовать округление не представляется возможным, т. к. решение, полученное после округления, может быть далеко от оптимального.

Рассмотрим на примере задачи с двумя переменными специфику, порождаемую тем, что величины  $a_r$  и  $b_r$  в ограничении (2) – положительные числа, а целевая функция (1) располагается симме-

трично относительно начала координат. На рис. 4 представлен пример такой задачи и дана ее геометрическая интерпретация.

Штриховкой на рис. 4 выделена область допустимых решений, сформированная ограничениями задачи. Координаты любой целочисленной точки этой области удовлетворяют всем ограничениям задачи. Из рис. 4 видно, что решением задачи без учета условия целочисленности является точка  $X$  с координатами  $x_1=1,1$  и  $x_2=1,7$ . Значение целевой функции в точке  $X$  равно  $x_1+x_2=1,1+1,7=2,8$ . Целевая функция, проходящая через точку  $X$  и равная 2,8, показана на рис. 4. Решение в точке  $X$  является оптимальным, т. к. нет другой точки в области допустимых решений, которая соответствует значению целевой функции меньшему 2,8.

Основная специфика области допустимых решений задачи целочисленного покрытия заключается в том, что, округлив значения координат в точке  $X$  в большую сторону, мы получим целочисленную точку, которая гарантировано располагается в этой области. Заметим, что при округлении в большую сторону нулевые значения координат точки  $X$  воспринимаются как дробные и преобразуются («округляются») в 1. Так, например, точка  $X$  с координатами (1,3; 0; 2,8) после округления преобразуется в точку  $X'=(2,1,3)$ .

Такая гарантия обусловлена тем, что гиперплоскости (в данном случае линии), представленные ограничениями (2) с положительными значениями величин  $a_r$  и  $b_r$ , имеют положительный наклон. Это означает, что гиперплоскость пересекает оси координат в положительной части. При повороте линии  $x_1+4x_2=8$  вокруг точки  $X$  против часовой стрелки она сохраняет положительный наклон до тех пор, пока не станет параллельной оси  $x_1$ . Если продолжить поворот дальше, то линия будет пересекать ось  $x_1$  в отрицательной части. Нетрудно видеть, что при отрицательном наклоне линии точка  $X'$  может быть отсечена и оказаться за пределами

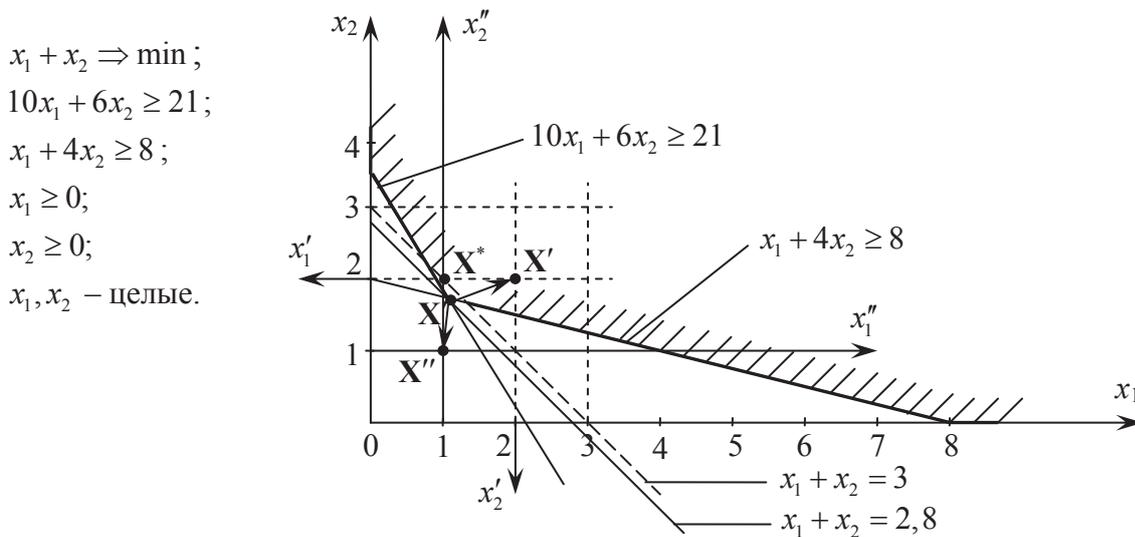


Рис. 4. Геометрическая интерпретация специфики задачи покрытия

области допустимых решений. Из этого следует, что наличие отрицательных величин  $a_{rv}$  и  $b_r$  (отрицательных наклонов гиперплоскостей) не гарантирует попадание точки  $X'$ , полученной после округления в большую сторону, в область допустимых решений.

Второе важное свойство, которое вытекает из положительного наклона гиперплоскостей, формирующих область, заключается в том, что оптимальное целочисленное решение задачи располагается в подобласти, которая формируется ограничениями относительно новой системы координат  $x'_1$  и  $x'_2$  с началом в точке  $X'$ . Из рис. 4 видно, что новые оси координат относительно исходных направлены в противоположную сторону. Перенос начала координат в точку  $X'$  и смена ориентации осей координат соответствует следующему формальному преобразованию ограничений (2):

$$\sum_{v=1}^r a_{rv} x_v \leq \sum_{v=1}^r a_{rv} x'_v - b_r \leq b'_r. \quad (5)$$

Для нашего примера с учетом того, что точке  $X'$  соответствуют координаты  $x'_1=2$  и  $x'_2=2$ , имеем:

$$10x_1 + 6x_2 \leq 10 \cdot 2 + 6 \cdot 2 - 21 \leq 11; \\ x_1 + 4x_2 \leq 1 \cdot 2 + 4 \cdot 2 - 8 \leq 2.$$

На рис. 4 видно, что подобласть, сформированная данными ограничениями и новыми осями координат, содержит точку  $X^*$ , которая соответствует оптимальному решению исходной задачи (1)–(3). Более того, в новой подобласти оптимальное целочисленное решение следует искать среди неотсеченных гиперплоскостями вершин единичного гиперкуба (в нашем случае квадрата), выделенных новыми осями координат с началом в точке  $X'$ . Для поиска такой вершины необходимо решить задачу линейного программирования с булевыми переменными:

$$x'_1 + x'_2 \Rightarrow \max; 10x'_1 + 6x'_2 \leq 11; x'_1 + 4x'_2 \leq 2.$$

Решением данной задачи является точка (булевский вектор)  $X^{*s}=(1;0)$ , т. е.  $x_1^{*s}=1$ ,  $x_2^{*s}=0$ . Для получения оптимального (минимального) решения задачи в исходных координатах нужно из вектора точки  $X'$  вычесть вектор точки  $X^{*s}$ , т. е.  $X^* = X' - X^{*s} = (2;2) - (1;0) = (1;2)$ . Действие вычитания объясняется тем, что при округлении в большую сторону мы сместили точку (решение) в глубь области, а при вычитании найденного булевского вектора мы вернулись в точку на максимально возможную величину к поверхности области. Решение  $X^*=(1;2)$  соответствует значению целевой функции  $x_1+x_2=3$ , которая на рис. 4 показана пунктирной линией.

Для решения задачи (1)–(3) можно использовать округление в меньшую сторону и перенос начала координат в точку  $X''$ , как это показано на рис. 4. В этом случае также решается задача линейного программирования с булевыми перемен-

ными. Ограничения (2) относительно точки  $X''$  преобразуются согласно следующему выражению:

$$\sum_{v=1}^r a_{rv} x_v \geq b_r - \sum_{v=1}^r a_{rv} x''_v \geq b''_r. \quad (6)$$

В примере, учитывая, что в точке  $X''$  имеем координаты  $x''_1=1$ ,  $x''_2=1$ , ограничения преобразуются в следующий вид:

$$10x_1 + 6x_2 \geq 21 - 10 \cdot 1 - 6 \cdot 1 \geq 5; \\ x_1 + 4x_2 \geq 8 - 1 \cdot 1 - 4 \cdot 1 \geq 3.$$

Таким образом, задача покрытия с булевыми переменными в этом случае запишется в виде:

$$x''_1 + x''_2 \Rightarrow \min; 10x''_1 + 6x''_2 \geq 5; ax''_1 + 4x''_2 \geq 3.$$

Решением данной задачи является булевский вектор  $X''^{*s}=(0;1)$ . Для получения оптимального решения относительно исходных координат нужно к вектору точки  $X''$  прибавить вектор точки  $X''^{*s}$ , т. е.  $X^* = X'' + X''^{*s} = (1;1) + (0;1) = (1;2)$ .

Для решения задачи линейного программирования с булевыми переменными в постановке (4), (5) или (4), (6) имеются специальные алгоритмы, например, использующие схему метода ветвей и границ [4]. Заметим также, что для задачи в постановке (1), (5) или (1), (6) специфика целевой функции (1), а именно симметричность её расположения относительно начала координат, обуславливает возможность разработки алгоритма, основанного на учёте указанной специфики. Разработка такого алгоритма является предметом отдельного исследования.

#### Заключение

Задача выбора минимального числа станций вычислительной системы при проектировании распределенной системы управления сформулирована как задача целочисленного линейного программирования. Для рассматриваемой области применения задача имеет две важные особенности: первая – все величины в ограничениях являются положительными числами, что соответствует положительному наклону гиперплоскостей, формирующих область допустимых решений, вторая – коэффициенты при переменных в целевой функции равны, что означает симметричность расположения ее относительно координат. Задачи с указанными особенностями выделены в отдельный подкласс, названный задачами целочисленного покрытия. Эти особенности обусловили возможность разбиения данной задачи на две более простых – задачу линейного программирования и задачу булевского покрытия. Таким образом, предложенный метод решения рассматриваемой задачи целочисленного покрытия по сложности оказался сопоставим со сложностью задач линейного программирования.

*Работа выполнена в рамках государственной задачи «Наука».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погребной Ал.В. Определение числа и топологии размещения станций многопроцессорной вычислительной системы // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 160–164.
2. Схрейвер А. Теория линейного и целочисленного программирования: В 2-х т. Т. 1 / пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 360 с.
3. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит. 1969. – 368 с.
4. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.

*Поступила 03.09.2013 г.*

UDC 519.854.3

## DETERMINATION OF MINIMUM NUMBER OF STATIONS FOR CONNECTING TERMINAL POINTS OF CONTROL OBJECT

Al.V. Pogrebnoy

Tomsk Polytechnic University

*The relevance of the research is caused by a wide spreading of real time systems and by the necessity to develop the computer-aided design techniques for such systems. The aim of the research is to develop the technique for determining minimum number of computer network stations which are capable of connecting the set of terminal points of a control object. The author has used the achievements in the field of linear programming with integer and Boolean variables. The task of selection of minimum number of stations connecting the given set of terminal points of the control object was stated as the integer linear programming. The author singled out this task features for the field of application under consideration. Taking into account these features the methods was developed. It is more efficient than the existing methods for solving the integer programming problems. The method allows locating the search for optimal solution among the vertices of unit hypercube using the Simplex Method.*

**Key words:**

*Integer linear programming, integer covering, Boolean covering, Simplex Method.*

## REFERENCES

1. Pogrebnoy Al.V. Opredelenie chisla i topologii razmeshcheniya stantsiy mnogoprotsessornoy vychislitelnoy sistemy [Determination of a number and topology of multiprocessor station position], *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 7, pp. 160–164.
2. Skhreyver A. *Teoriya lineynogo i tselochislennogo programmirovaniya* [Theory of linear and integer programming]. Moscow, Mir, 1991, vol. 1, 360 p.
3. Korbut A.A., Finkelshteyn Yu.Yu. *Diskretnoe programmirovaniye* [Discrete programming]. Moscow, Nauka. Gl.red.Fiz.-mat. Lit., 1969. 368 p.
4. Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsyi v primerakh i zadachakh* [Optimisation techniques in examples and problems]. Moscow, Vysshaya shkola, 2002. 544 p.

УДК 519.171.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИНОМИАЛЬНОСТИ МЕТОДА ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПИСАТЕЛЯ СТРУКТУРЫ ГРАФА

В.К. Погребной, Ан.В. Погребной

Томский политехнический университет  
E-mail: avpogrebnoy@gmail.com

**Актуальность исследования** определяется большой потребностью в разработке эффективных методов инвариантного описания и анализа абстрактных структур графовых моделей.

**Цель работы** заключается в обосновании полиномиальности предложенного авторами метода вычисления интегрального описателя абстрактной структуры графа.

**Методы исследования** основываются на использовании аппарата теории графов и методов свободной и зависимой интеграции кодов структурных различий графов.

**В результате исследования** введено понятие устойчивых групп вершин в графе и сформулированы условия возникновения и существования таких групп в процессе интеграции кодов структурных различий при вычислении интегрального описателя структуры – Integral structure descriptor (ISD). Для устойчивых групп установлен ряд свойств, которые раскрывают правомерность применения основных правил метода ISD и его полиномиальности. На основе выделенных свойств установлено, что условия существования устойчивых групп обусловлены жесткими ограничениями, а вершины разных устойчивых групп не могут порождать новые устойчивые группы. Установлен также фактор полной обособленности устойчивых групп, что в значительной мере предопределило эффективность алгоритма вычисления интегрального описателя структуры графа. Полиномиальность метода показана для наиболее трудного случая, когда графы являются однородными и содержат устойчивые группы. Для экспериментальных исследований метода ISD на языке Java разработано программное средство GraphISD и приведены некоторые результаты его работы.

### Ключевые слова:

Интегральный описатель структуры, изоморфизм графов, абстрактная структура графа, устойчивая группа вершин, область интеграции кодов, полиномиальность алгоритма.

### Введение

Предложенный в [1] метод интеграции структурных различий позволяет получать интегральный описатель структуры графа. Метод даёт возможность выявить и объединить (интегрировать в описатель) имеющиеся в графе структурные различия так, чтобы каждая вершина получила свой интегральный описатель в виде уникального числового кода. Интегральные описатели вершин графа  $G$  образуют вектор  $D(G)$ , который получил название интегрального описателя структуры графа – Integral Structure Descriptor (ISD). В работе [2] метод вычисления ISD был адаптирован для решения задач определения оценок сходства структур двух графов на основе выделения в них общих частей. При этом были исследованы некоторые свойства однородных групп вершин, возникающих в процессе интеграции структурных различий.

В работах [1, 2] отмечалось также, что однородные группы при определенных условиях переходят в категорию устойчивых, наличие которых приводит к заметному усложнению работы метода определения ISD. В связи с этим актуальными становятся исследования по двум направлениям – определить влияние устойчивых групп на объемы вычислений при получении ISD и проверить, находятся ли эти объёмы в рамках полиномиальных оценок сложности [3]. Получению ответов на эти вопросы посвящена данная работа. Основное внимание уделено исследованию свойств устойчивых групп. На основе выделенных свойств установлена полиномиальность предельных оценок сложности

для наиболее неблагоприятного сценария процесса интеграции структурных различий. Экспериментальные исследования метода интеграции структурных различий проводились с помощью программы GraphISD, написанной на языке Java.

### Устойчивые однородные группы и их свойства

Рассматривается конечное множество  $M(S)$  обыкновенных связных графов, имеющих равные степенные инварианты, представленные вектором  $S$ . Множество  $M(S)$  представим совокупностью классов изоморфных графов. В одном из классов выделим граф  $G$  в качестве представителя этого класса. Соответственно, класс изоморфных графов, представленный графом  $G$  с инвариантом  $S$ , именуется как  $G(S)$ .

Будем считать, что для графа  $G=(E,U)$  с помощью метода свободной интеграции кодов структурных различий (метода ISD) получен вектор  $D(G)=\{d_i\}$  интегральных описателей  $d_i$  вершин  $e_i \in E$  и сформирована область интеграции  $W_G(S)$  для класса  $G(S)$ . Пример процесса свободной интеграции представим в виде рекуррентной последовательности преобразований векторов  $D^k \Rightarrow D^{k+1}$ :

$$\begin{aligned} D^0 &\Rightarrow D_{1*}^1 \Rightarrow D^2 \Rightarrow D^3 \Rightarrow D_{6*}^4 \Rightarrow \\ &\Rightarrow D^5 \Rightarrow D_{4*}^6 \Rightarrow D^7 \Rightarrow D^8 = D(G). \end{aligned} \quad (1)$$

Из записи (1) следует, что для получения вектора  $D(G)$  потребовалось выполнить 8 шагов преобразований  $D^k \Rightarrow D^{k+1}$ . На  $k$ -м шаге метод ISD устанавливает для каждой вершины  $e_i \in E$  код  $k$ -го уровня интеграции  $d_i^k$ , характеризующий особое положение данной вершины относительно других вершин

графа. В методе ISD введено два правила назначения кодов  $d_i^k$ . Правило 1 отражает результат интеграции структурных различий, а правило 2 используется для «разрушения» устойчивых групп путём назначения вершине абстрактного (виртуального) различия.

Если в графе  $G$  на  $k$ -м шаге интеграции некоторые вершины  $e_i \in E$  занимают одинаковое положение относительно вершин  $E \setminus e_i$ , то они получают равные коды  $d_i^k$ . Совокупность вершин, у которых значения  $d_i^k$  в векторе  $D^k$  совпадают, образуют однородную группу  $E_d^k$  с  $d_i^k = d$ . Однородные группы  $E_d^k$  в векторе  $D^k$  называются устойчивыми, если при переходе  $D^k \Rightarrow D^{k+1}$  максимальное значение кода  $d^{k+1}$  в векторе  $D^{k+1}$  не превышает максимального значения кода  $d_i^k$  в векторе  $D^k$ . В этом случае для продолжения процесса интеграции в одну из устойчивых групп вектора  $D^{k+1}$  по правилу 2 вводится виртуальное структурное различие. В записи (1) такая ситуация отмечена при переходах  $D^0 \Rightarrow D^1$ ,  $D^3 \Rightarrow D^4$ ,  $D^5 \Rightarrow D^6$ . В соответствующих векторах шаги  $k=1, 4, 6$  помечены дополнительным индексом  $v=1, 2, 3$ , который обозначает порядковый номер шага, где применялось правило 2.

Устойчивые группы и их свойства играют важную роль в понимании процесса интеграции кодов по методу ISD и обосновании правил формирования области интеграции  $W_G(S)$ . Свойства устойчивых групп позволили установить полиномиальность оценок объёмов вычислений при поиске векторов  $D_G(H)$  для графов  $H$  из множества  $M(S)$ . Поиск осуществляется на основе зависимой интеграции кодов с помощью метода ISD относительно области  $W_G(S)$ . Индекс  $G$  в обозначении  $D_G(H)$  показывает, что вектор ISD получен в зависимости от системы кодирования  $W_G(S)$ . Формат статьи не позволяет рассмотреть и обосновать всё многообразие свойств устойчивых групп, поэтому ниже рассматриваются только те из них, которые непосредственно подтверждают правомерность применения правил формирования области  $W_G(S)$  и проверки наличия у графа  $H$  из множества  $M(S)$  вектора  $D_G(H)$ , который по составу кодов совпадает с вектором  $D(G)$ . В этом случае граф  $H$  принадлежит классу  $G(S)$ . Совокупность свойств представлена в форме ряда утверждений. Каждое утверждение сопровождается необходимыми дополнительными пояснениями, которые основываются на теории интеграции кодов структурных различий в абстрактных структурах графов.

**Утверждение 1.** В графе  $G$  устойчивая группа с множеством вершин  $E_d^{k_v} \subset E$  может существовать только в виде однородного подграфа. Вершины в подграфе имеют равные значения степеней  $S_d$  из множества значений  $(0, 1, 2, \dots)$ . Вершины  $e_i \in E_d^{k_v}$  в графе  $G$ , независимо от того, является он однородным или нет, также должны иметь равные степени  $S_i$  и при этом  $S_i > S_d$ . Однородный подграф на основе вершин устойчивой группы  $E_d^{k_v}$  может состоять из одной или нескольких компонент связности, каждая из которых также является однородным под-

графом степени  $S_d$ . Подграфы устойчивых групп  $E_d^{k_v}(G)$  и  $E_d^{k_v}(H)$ , полученные в графах  $G$  и  $H$  на шаге  $k_v$  после введения виртуального различия по правилу 2 при  $S_d=0$ , являются пустыми, при  $S_d=1$  подграфы содержат четное число вершин и являются изоморфными, при  $S_d=2$  подграфы изоморфны для числа вершин 3, 4, 5, а при 6 и более вершин подграфы могут состоять из нескольких компонент связности. Приведенные свойства легко подтверждаются на основе анализа множеств кодов  $d_i^k$  в инциденторах  $F(e_i)$  для вершин  $e_i \in E_d^{k_v}$  и определения устойчивой группы.

**Утверждение 2.** Окружением устойчивой группы  $E_d^{k_v}$  являются другие устойчивые группы и вершины с уникальными кодами. Однородный граф можно рассматривать в качестве устойчивой группы  $E_d^{k_1}$  на шаге  $k_1=1$ , у которой  $d=1$  и отсутствует окружение. Если две устойчивые группы  $E_{d_1}^{k_v}$  и  $E_{d_2}^{k_v}$  связаны между собой, то каждая вершина  $e_i \in E_{d_1}^{k_v}$  с вершинами группы  $E_{d_2}^{k_v}$  должна иметь одинаковое число связей (ребер). Аналогичное условие должно выполняться и для вершин группы  $E_{d_2}^{k_v}$ , т. е. структура связей между двумя группами должна быть однородной. Если устойчивая группа  $E_d^{k_v}$  связана с вершиной  $e_j$ , имеющей уникальный код  $d_j^{k_v}$ , то каждая вершина  $e_i \in E_d^{k_v}$  должна быть связана с вершиной  $e_j$ . Из этого следует, что число вершин в группе  $E_d^{k_v}$  в этом случае не может превышать степень вершины  $e_j$ .

**Утверждение 3.** Все вершины устойчивой группы  $E_d^{k_{v+1}}$ , полученной на шаге  $k_{v+1}$ , принадлежат только одной из групп  $E_d^{k_v}$ , существовавших ранее на шаге  $k_v$ , т. е.  $E_d^{k_{v+1}} \subseteq E_d^{k_v}$ . Это утверждение отражает принципиально важное свойство устойчивых групп и процесса интеграции кодов структурных различий. Из него следует, что на шаге  $k_v$  после введения в одну из групп по правилу 2 виртуального различия число вершин ни в одной из групп на шаге  $k_{v+1}$  не может возрасти. При этом отдельные группы «разрушаются», остаются неизменными либо преобразуются в более мелкие. Доказательство этого утверждения строится на основе анализа и сопоставления деревьев, отражающих интеграцию кодов вершин, входящих в рассматриваемую группу.

**Утверждение 4.** Вершина  $e_i \in E_d^{k_v}$ , получившая на  $k$ -м шаге интеграции уникальный код  $d_i^{k_v}$  по правилу 2, сохраняет свою уникальность до конца процесса интеграции. Это даёт возможность на очередном  $(k+1)$ -м шаге интеграции для таких вершин переносить без изменения уникальный код  $d_i^{k_v}$  из вектора  $D^k$  в вектор  $D^{k+1}$ . Вершины, получившие уникальный код  $d_i^k$  по правилу 1, также сохраняют свою уникальность, но в процессе интеграции должны участвовать на общих основаниях. Из этого следует, что если вершина  $e_i$  в графе  $G$  и вершина  $e_j$  в графе  $H$  получили уникальные коды  $d_i^k = d_j^k$ , то при изоморфизме графов  $G$  и  $H$  вершины  $e_i$  и  $e_j$  в подстановке изоморфизма образуют пару  $(e_i, e_j)$ . Здесь доказательство строится на основе сопоставления кодов двух вершин. Если на  $k$ -м шаге вер-

шина  $e_i$  получает код  $d_i^k$ , который отличает её от кода  $d_j^k$  вершины  $e_j$ , т. е.  $d_i^k \neq d_j^k$ , то это означает, что вершины  $e_i$  и  $e_j$  интегрировали разные структурные различия. Эти различия в ходе последующей интеграции не теряются, они только могут пополниться новыми, т. к. код вершины интегрирует (накапливает) все структурные различия, обнаруженные на любом шаге интеграции. Поэтому у вершин с  $d_i^k \neq d_j^k$  равенство кодов  $d_i^t = d_j^t$  при  $t > k$  невозможно.

**Утверждение 5.** Устойчивая группа  $E_d^{k_v}(H)$ , полученная на  $k_v$ -м шаге интеграции кодов в графе  $H$  относительно области  $W_G(S)$ , и соответствующая ей устойчивая группа  $E_d^{k_v}(G)$  в графе  $G$ , в случае изоморфизма графов  $G$  и  $H$ , в подстановке изоморфизма образуют паросочетание. Данное утверждение можно рассматривать как некоторую аналогию утверждения 4, если устойчивые группы в утверждении 5 воспринимать в качестве отдельных объектов с уникальными кодами по аналогии с вершинами в утверждении 4. Важность утверждения 5 состоит в том, что оно отражает обособленность вершин устойчивой группы при определении изоморфизма графов  $G$  и  $H$ . Другими словами, если вершины  $e_{i_1}$  и  $e_{i_2}$  принадлежат устойчивой группе  $E_d^{k_v}(G)$ , то вершины  $e_{j_1}$  и  $e_{j_2}$ , которые в подстановке изоморфизма графов  $G$  и  $H$  с вершинами  $e_{i_1}$  и  $e_{i_2}$  образуют пары, должны принадлежать устойчивой группе  $E_d^{k_v}(H)$ .

**Утверждение 6.** При поиске в графе  $H$  вектора  $D_G(H)$  по составу кодов  $d_j$ , совпадающего с кодами  $d_i$  вектора  $D(G)$  в условиях наличия в области  $W_G(S)$  шага  $k_v$ , на котором в устойчивую группу  $E_d^{k_v}(G)$  согласно правилу 2 вводилось виртуальное различие, необходимым и достаточным является последовательное назначение данного виртуального различия каждой вершине в соответствующей группе  $E_d^{k_v}(H)$  и выполнение процесса интеграции до шага  $k_{v+1}$  или получение вектора  $D_G(H)$ . Необходимость выполнения процессов интеграции относительно каждой вершины группы  $E_d^{k_v}(H)$  обусловлена тем, что при формировании области  $W_G(S)$  на шаге  $k_v$  виртуальное различие назначалось произвольно для одной из вершин  $e_i$  группы  $E_d^{k_v}(G)$ . Поэтому требуется установить, какая из вершин  $e_j$  из группы  $E_d^{k_v}(H)$  может войти в пару  $(e_i, e_j)$  в подстановке изоморфизма графов  $G$  и  $H$ . Исходя из свойства обособленности устойчивых групп, отмеченного в утверждении 5, выполнение процессов интеграции относительно вершин группы  $E_d^{k_v}(H)$  является достаточным.

Первые три утверждения в основном отражают некоторые условия возникновения и существования устойчивых групп. Здесь можно отметить, что эти условия являются весьма жесткими. Появление устойчивых групп в структуре графа возможно лишь при наличии симметричности в отношениях между вершинами. Условия симметричности должны соблюдаться не только между вершинами внутри устойчивых групп, но и с вершинами окружения. Любые нарушения симметричности по-

рождают структурные различия и нарушают условия существования устойчивых групп.

Последние три утверждения раскрывают правомерность применения основных правил, используемых в алгоритме поиска вектора  $D_G(H)$  при наличии устойчивых групп. В первую очередь это относится к свойству обособленности вершин с уникальными кодами и устойчивых групп. Фактор обособленности устойчивых групп дает возможность резко сократить область поиска вектора  $D_G(H)$ .

#### Полиномиальность алгоритма поиска вектора $D_G(H)$

Объем вычислений, который требуется алгоритму по методу ISD, зависит от числа шагов интеграции, выполняемых при определении вектора ISD. Для графа  $G$ , представляющего класс графов  $G(S)$ , общий объем вычислений  $L(G)$  при формировании области интеграции  $W_G(S)$  и определении вектора  $D(G)$  составит

$$L(G) = \Delta k \tau(n, m), \quad (2)$$

где  $\tau(n, m)$  – объем вычислений при выполнении одного шага интеграции для графа, содержащего  $n$  вершин и  $m$  ребер;  $\Delta k$  – число шагов интеграции, выполняемых при переходе от вектора  $D^0$  к вектору  $D^{k+1} = D(G)$ .

Значение величины  $\tau(n, m)$  зависит не только от числа вершин  $n$ , но и от числа ребер  $m$ , что отражается на заполнении матрицы смежности вершин ненулевыми элементами и определяет размерность множеств кодов инциденторов  $F(e_i)$ , которая влияет на объем вычислений. В ходе интеграции с ростом числа вершин с уникальными кодами число формируемых множеств  $F(e_i)$  уменьшается и соответственно снижается значение  $\tau(n, m)$ . Будем считать, что для определенных интервалов значений чисел вершин и ребер установлены усредненные значения  $\tau(n, m)$ . Вторая величина в выражении (2) не может превышать величину  $n$ , т. е.  $\Delta k < n$ . Это обусловлено тем, что каждый шаг интеграции приводит к росту числа отличающихся кодов, назначаемых по правилу 1 или 2.

Для графа  $H$ , в котором процесс интеграции осуществляется относительно области  $W_G(S)$ , объем вычислений  $L(H)$  при поиске вектора  $D_G(H)$ , совпадающего по составу кодов с вектором  $D(G)$ , зависит от наличия устойчивых групп. Если в таких векторах упорядочить коды по возрастанию, то полученные векторы  $D_G^*(H)$  и  $D^*(G)$  совпадут, т. е.  $D_G^*(H) = D^*(G)$ . Заметим, что если граф  $G$  неоднородный и процесс интеграции в нём не приводит к появлению устойчивых групп, то величина  $L(H)$  определяется по выражению (2).

Наличие устойчивых групп в графе  $G$  усложняет поиск в графе  $H$  вектора  $D_G^*(H) = D^*(G)$ . Вместе с тем свойство обособленности устойчивых групп и отдельных вершин с уникальными кодами, которые также можно рассматривать как устойчивые группы, содержащие по одной вершине, оказалось настолько полезным, что сделало возможным задачу поиска  $D_G^*(H) = D^*(G)$  исключить из класса не-

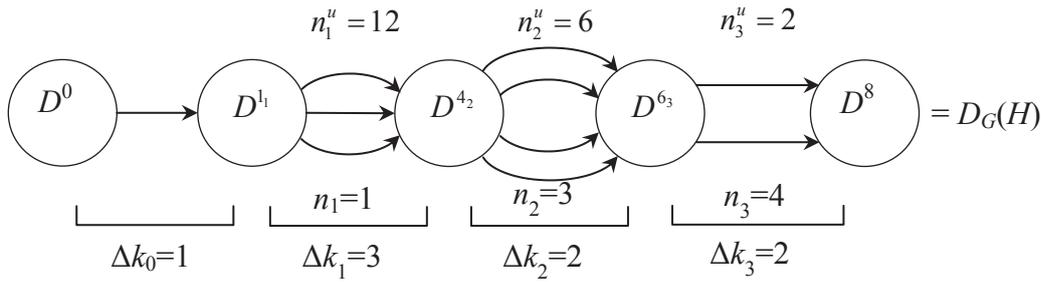


Рис. 1. Схема поиска вектора  $D_G(H)$  относительно примера в записи (1)

полиномиальной сложности. Напомним, что поиск  $D_G^*(H) = D^*(G)$  соответствует решению задачи определения изоморфизма, т. к. при соблюдении этого условия графы  $G$  и  $H$  изоморфны.

Данные вопросы рассмотрим более подробно. При этом будем придерживаться примера процесса интеграции, приведённого в записи (1). Схему поиска вектора  $D_G(H)$  относительно области  $W_G(S)$ , полученную для данного примера, представим на рис. 1.

Согласно записи (1), общее число шагов  $\Delta k = 8$  в процессе интеграции разбивается на 4 интервала, которые в явном виде приведены на рис. 1. Начальный интервал  $\Delta k_0$  содержит число шагов при переходе от вектора  $D^0$  к  $D^{k_1}$ . Если граф  $G$  и, соответственно, граф  $H$  являются однородными, то  $\Delta k_0 = 1$ . В нашем примере графы  $G$  и  $H$  однородны, т. к.  $D^{k_1} = D^1$ , т. е. уже на шаге  $k=1$  потребовалось вводить первое виртуальное различие и шаг  $k=1$  пометить индексом  $v=1$ . Индекс  $v$  обозначает порядковый номер вектора  $D^k$ , содержащего устойчивые группы. Последующий интервал  $\Delta k_1 = 3$  указывает на число шагов от  $D^1$  до  $D^{4_2}$ . Аналогично следующий интервал  $\Delta k_2 = 2$ , а последний интервал  $\Delta k_3 = 2$  равен числу шагов от  $D^{6_3}$  до вектора  $D^8 = D_G(H)$ .

При подсчете общего числа шагов, которые требуется выполнить в процессе поиска вектора  $D_G(H)$ , будем исходить из того, что на каждом интервале от  $D^{k_v}$  до  $D^{k_{v+1}}$  виртуальное различие будет поочередно вводиться для всех вершин устойчивой группы  $E_d^{k_v}(H)$ , выбранной в соответствии с  $W_G(S)$ . Число вершин в этой группе обозначим величиной  $n_v^u$ . Если на предыдущем интервале от  $D^{k_{v-1}}$  до  $D^{k_v}$  после введения виртуального различия вершинам устойчивой группы  $E_d^{k_{v-1}}(H)$  с числом вершин  $n_{v-1}^u$  процесс интеграции относительно  $W_G(S)$  успешно завершится в векторе  $D^{k_v}$  для нескольких вершин  $n_v$  из числа  $n_{v-1}^u$ ,  $n_v < n_{v-1}^u$ , то на интервале от  $D^{k_v}$  до  $D^{k_{v+1}}$  процесс интеграции должен быть выполнен для каждого варианта  $D^{k_v}$  из числа  $n_v$ . Таким образом, число шагов на интервале от  $D^{k_v}$  до  $D^{k_{v+1}}$  составит величину  $\Delta k_v \cdot n_v \cdot n_v^u$ . Например, для интервала  $D^{4_2} \rightarrow D^{6_3}$  (рис. 1) потребуется выполнить  $\Delta k_2 \cdot n_2 \cdot n_2^u = 2 \cdot 3 \cdot 6 = 36$  шагов.

Исходя из этого, предельный объём вычислений  $L(H)$ , который может потребоваться при поиске вектора  $D_G(H)$ , складывается из объёмов вычислений по каждому интервалу и оценивается следующим полиномом:

$$L(H) = (\Delta k_0 + \sum_{v=1}^V n_v n_v^u \Delta k_v) \tau(n, m). \quad (3)$$

Здесь  $\Delta k_0$  – число шагов интеграции от вектора  $D^0$  до вектора  $D^{k_1}$ , содержащего устойчивые группы;  $\Delta k_v$  – число шагов интеграции между векторами  $D^{k_v}$  и  $D^{k_{v+1}}$ ,  $v=1, 2, \dots, V$ ,  $V$  – число векторов  $D^{k_v}$ , содержащих устойчивые группы;  $n_v$  – число вершин в устойчивой группе  $E_d^{k_v}(H)$ , для которых после введения виртуального различия согласно  $W_G(S)$  и выполнения  $\Delta k_v$  шагов интеграции достигнуто соответствие вектора  $D^{k_v}$  и записи в строке  $k_v$  области  $W_G(S)$ ;  $n_v^u$  – число вершин в устойчивой группе  $E_d^{k_v}(H)$ , для которых на шаге  $k_v$  согласно  $W_G(S)$  вводятся виртуальные различия.

Полином (3) оценивает предельные объёмы вычислений, когда на каждом интервале  $\Delta k_v$  процесс интеграции выполняется для всех вариантов, т. е. всякий раз после введения виртуального различия для каждой вершины устойчивой группы, и только после этого происходит переход от интервала  $\Delta k_v$  к  $\Delta k_{v+1}$ . Такое представление работы алгоритма поиска вектора  $D_G(H)$  удобно для формальной записи значения предельной оценки  $L(H)$  в виде полинома.

В действительности программа GraphISD реализует более эффективную схему поиска, когда процесс интеграции в каждом интервале  $\Delta k_v$  выполняется для одного из альтернативных вариантов до тех пор, пока соблюдается соответствие кодам  $W_G(S)$ . При несоответствии кодов делается обратный ход к ближайшему альтернативному варианту выполнения процесса интеграции. Если вектор  $D_G(H)$  удастся получить после введения виртуального различия для очередной вершины устойчивой группы, то нет смысла продолжать поиск для последующих вершин. Программа GraphISD фиксирует первый найденный интегральный описатель  $D_G(H)$  и по желанию пользователя может продолжить поиск другого описателя, в том числе и с формированием новых систем кодирования, выбирая другие устойчивые группы.

Результат работы программы GraphISD при поиске вектора  $D_G(H)$  показан на рис. 2. Графы  $G$  и  $H$  с равными степенными инвариантами представлены матрицами смежности вершин (граф  $G$  – в верхней части рис. 2, граф  $H$  – в нижней). Для получения вектора  $D_G$  потребовалось 6 шагов интеграции. Виртуальное различие вводилось один раз на

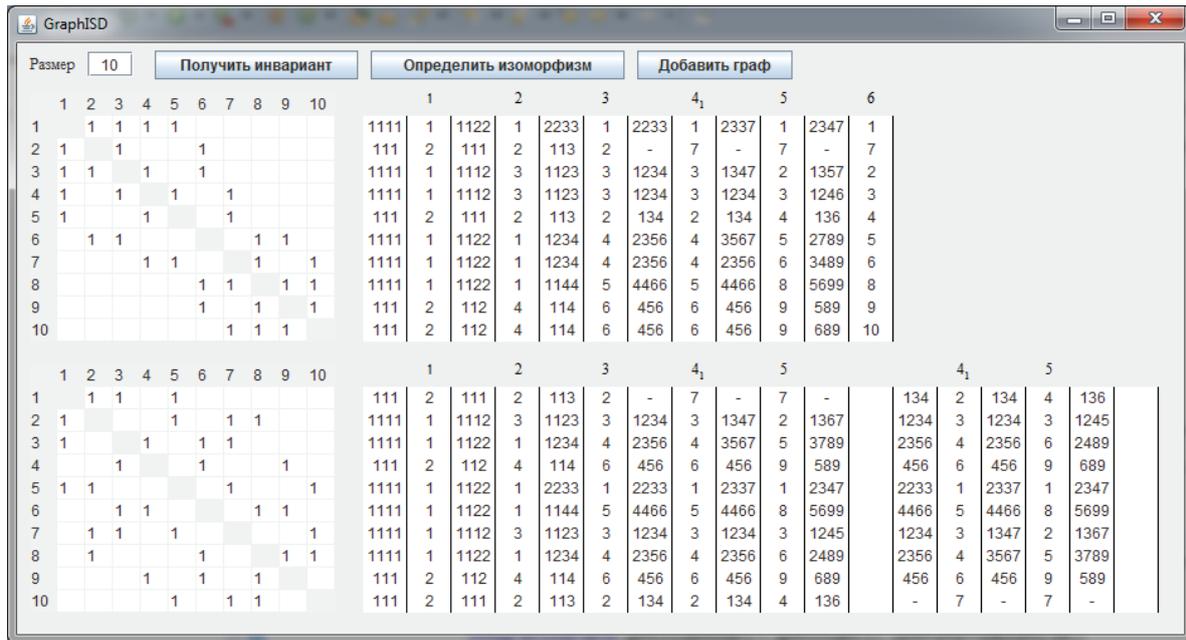


Рис. 2. Пример поиска вектора  $D_G(H)$  с помощью программы GraphISD

4-м шаге в устойчивую группу  $E_2^{41}(G)=(e_2, e_3)$ . Для поиска вектора  $D_G(H)$  потребовалось 9 шагов интеграции. Вектор  $D_G(H)$  найти не удалось, т. е. граф  $H$  неизоморфен графу  $G$ .

Очевидно, что наибольший объем вычислений предполагается в случае однородного графа и соответствует полиному (3). Эффективность алгоритма поиска  $D_G(H)$  может быть улучшена при более полном учете свойств, приведенных в утверждениях 1–6, а также других свойств и не только устойчивых, но и однородных групп [2]. В частности, для однородных графов с целью начальной дифференциации вершин вместо степенного инварианта можно использовать другие легко вычисляемые инварианты.

Вместе с тем алгоритм поиска вектора  $D_G(H)$  и в изложенном варианте способен успешно решать задачи разбиения множества графов на подмножества изоморфных или выбора из него таких графов, которые изоморфны заданному. При разработке метода ISD эти задачи были отмечены как частный случай более общей и существенно более сложной проблемы определения оценок сходства двух графов [2]. Поэтому изложенные выше результаты исследований по устойчивым группам, формированию области интеграции и поиску вектора  $D_G(H)$  расширяют возможности формального описания и анализа сходства абстрактных структур графов на основе метода ISD.

**Заключение**

Интегральный описатель структуры (ISD) и метод его получения, названный методом ISD, стали

теоретической основой для решения ряда задач, связанных с представлением и анализом абстрактных структур графов. С помощью метода ISD, наряду с получением интегрального описателя структуры, решены задачи определения изоморфизма графов и гиперграфов, вычисления полных инвариантов графов, определения ряда оценок сходства структур. В данной работе основное внимание уделено исследованию свойств устойчивых групп вершин, которые могут выделяться в графе в процессе интеграции кодов структурных различий по методу ISD. На основе этих свойств в работе показана полиномиальность алгоритма определения интегрального описателя структуры. Это означает, что все алгоритмы, основанные на методе ISD, будут иметь полиномиальные оценки сложности вычислений.

В последующих исследованиях свойств устойчивых групп и в задачах анализа абстрактных структур графов будет широко применяться программа GraphISD. Эта программа написана для исследовательских целей и содержит средства визуализации процесса интеграции кодов структурных различий и интерактивного участия пользователя. Программа представляет пользователю возможность наблюдать формирование системы кодирования и появление устойчивых групп, управлять процессом их разрушения, исследовать схемы поиска интегральных описателей относительно разных систем кодирования.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «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. Погребной В.К. Задача определения оценок сходства структур двух графов на основе выделения общих частей // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5. – С. 194–199.
3. Зыков А.А. Основы теории графов. – М.: Вузовская книга, 2004. – 664 с.

Поступила 03.09.2013 г.

UDC 519.171.1

**POLYNOMIALITY OF METHOD FOR COMPUTING GRAPH STRUCTURE INTEGRAL DESCRIPTOR**

V.C. Pogrebnoy, An.V. Pogrebnoy

Tomsk Polytechnic University

*The relevance of the research is caused by the necessity of developing the efficient method of invariant description and analysis of abstract structures of graph models. The aim of the research is to substantiate the polynomiality of the method for computing the integral descriptor of graph abstract structure proposed by the authors. The research techniques are based on application of machinery of graph theory and methods of free and dependent integration of codes of graph structural differences. The authors have introduced the notion of stable group of vertices in graph and stated the conditions of occurrence and existence of such groups at integration of structural differences codes when computing the integral structure descriptor. A number of features which disclose the appropriateness of application of the main rules of the integral structure descriptor and its polynomiality was determined for stable groups. It was ascertained on the basis of the defined features that the conditions for stable group existing are conditioned by hard limits; the vertices of different stable groups can not generate new stable groups. The authors have also defined the factor of full isolation of stable groups that predetermined considerably the efficiency of algorithm for computing the full graph structure descriptor. Polynomiality of the technique is demonstrated for the most complex case when graphs are homogeneous and contain stable groups. The authors developed Java GraphISD software for the experimental investigations of integral structure descriptor technique and introduced the results of its operation.*

**Key words:**

*Integral structure descriptor, graph isomorphism, abstract graph structure, stable group of vertices, code integration area, algorithm polynomiality.*

**REFERENCES**

1. Pogrebnoy V.K. Metod integratsii strukturnykh razlichiy v grafovyykh modelyakh i ego primeneniye dlya opisaniya struktur [Integration technique for structural differences in graph models and its application to describe the structures]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 10–16.
2. Pogrebnoy V.K. Zadacha opredeleniya otsenok skhodstva struktur dvukh grafov na osnove vydeleniya obshchikh chastey [The task of estimating the similarity of two graphs structures on the basis of general parts definition]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no 5, pp. 194–199.
3. Zykov A.A. *Osnovy teorii grafov* [Bases of graph theory]. Moscow, Vuzovskaya kniga, 2004. 664 p.

УДК 519.171.1

## ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОЛНОГО ИНВАРИАНТА ГРАФА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПИСАТЕЛЯ СТРУКТУРЫ

В.К. Погребной, Ан.В. Погребной

Томский политехнический университет  
E-mail: avpogrebnoy@gmail.com

**Актуальность исследования** заключается в том, что проблема поиска полного инварианта графа и полиномиального алгоритма его вычисления остаётся нерешенной.

**Цель работы** состоит в нахождении полного инварианта обыкновенного графа на основе интегрального описателя абстрактной структуры и в разработке эффективного алгоритма вычисления полного инварианта.

**Методы исследования** базируются на теории графов и теории интеграции кодов структурных различий в абстрактных структурах графов.

**В результате исследований** предложен алгоритм решения одной из наиболее сложных задач теории графов – вычисление полного инварианта графа. Алгоритм основан на методах свободной и зависимой интеграции кодов структурных различий в графе и характеризуется простотой, эффективностью, и имеет полиномиальную оценку предельного объема вычислений. Полный инвариант представлен в виде вектора интегральных описателей вершин абстрактной структуры графа и содержит информацию для формирования подстановки изоморфизма. На языке Java разработано программное средство GraphISD, реализующее предложенный алгоритм. Приведены примеры вычисления полных инвариантов при свободной и зависимой интеграции.

### Ключевые слова:

Полный инвариант графа, изоморфизм графов, интегральный описатель структуры, абстрактная структура графа, область интеграции кодов, полиномиальность алгоритма.

### Содержательная формулировка проблемы

В теории графов под инвариантом понимают некоторую количественную меру, которая характеризует структуру графа и не зависит от нумерации его вершин [1]. Например, упорядоченный по возрастанию или убыванию вектор значений степеней вершин графа является его инвариантом. Очевидно, что для двух изоморфных графов  $G$  и  $H$  инварианты, сформированные на основе степеней вершин, обозначим их  $S(G)$  и  $S(H)$ , совпадают, т. е.  $S(G)=S(H)$ . К настоящему времени накоплено много типов инвариантов, каждый из которых отражает некоторые особенности структуры графа. Большое число инвариантов (топологических индексов) введено для исследования структуры химических графов [2]. В частности, для взвешенных обыкновенных графов авторами в работе [3] введен ряд инвариантов на основе оценок компактности, а также на основе компактных подграфов.

Естественным является стремление найти инвариант или комбинацию инвариантов, которые бы однозначно представляли структуру графа с точностью до изоморфизма. Такие инварианты называются полными. Равенство полных инвариантов у двух графов является необходимым и достаточным условием их изоморфизма. В работе [4] подмечено, что попытку получить однозначное представление структуры с помощью инвариантов, характеризующих её отдельные свойства, можно сравнить с попыткой получить портрет лица путем составления фоторобота, используя при этом совокупность некоторых признаков. Как в первом случае, так и во втором, удаётся лишь достигнуть некоторого приближения к реальной структуре графа и к портрету конкретного лица.

Основная проблема здесь заключается в том, что в структуре графа множество количественных

оценок тесно связано с множеством скрытых отношений между ними. Поэтому попытки охватить всё многообразие этих отношений с помощью некоторой количественной меры, способной однозначно представить структуру графа, в общем случае приводят к неполиномиальным алгоритмам, сравнимым по сложности непосредственно с самой задачей определения изоморфизма.

В статье предлагается изменить подход к решению данной проблемы, отойти от поиска полного инварианта в виде некоторой количественной меры и сосредоточиться на получении полного инварианта на основе интегрального описателя структуры (Integral Structure Descriptor – ISD), используя для этого метод интеграции структурных различий (метод ISD), изложенный в [4].

В методе ISD для всех вершин графа рекуррентно формируется иерархическая система числовых кодов, которая однозначно представляет абстрактную структуру графа. На верхнем уровне этой системы каждой вершине графа сопоставляется уникальный код ISD, который интегрально описывает положение данной вершины относительно всех других вершин графа. Значения числовых кодов при этом не несут никакой смысловой нагрузки, а выступают в роли описателей (дескрипторов), идентифицирующих структуру графа.

Полный инвариант, вычисленный с помощью метода ISD, зависит от используемой при формировании числовых кодов системы кодирования, которая в [4] названа областью интеграции кодов. Поэтому для сравнения полных инвариантов графов  $G$  и  $H$  необходимо, чтобы коды ISD были получены относительно одной области интеграции. В этом случае равенство полных инвариантов гарантирует изоморфизм графов  $G$  и  $H$ .

Очевидно, что равенство полных инвариантов имеет смысл проверять для множества графов, у которых некоторые заранее заданные признаки (инварианты) совпадают. Например, в качестве такого множества, обозначим его  $M(S)$ , примем графы с равными степенными инвариантами, представленными заданным вектором  $S$ . Полные инварианты графов множества  $M(S)$  разбивают его на классы. Каждый класс содержит изоморфные графы, т. е. у них полные инварианты совпадают.

Учитывая, что класс содержит изоморфные графы, любой из них, например граф  $G$ , может представлять данный класс. В этом случае класс обозначается как  $G(S)$ . Для графа  $G$ , как представителя класса  $G(S)$  определяется полный инвариант  $P(G)$ , который в последующем рассматривается в роли образа (эталона) при поиске других графов из множества  $M(S)$ , относящихся к классу  $G(S)$ . Следуя концепции предложенного в [4] метода ISD, в ходе определения  $P(G)$  формируется область интеграции кодов  $W_G(S)$ , которая наряду с  $P(G)$  применяется в качестве эталона и устанавливает правила кодирования структурных различий для графов класса  $G(S)$ . Тогда полный инвариант  $P_G(H)$  графа  $H$  из множества  $M(S)$ , вычисленный в соответствии с системой кодирования области  $W_G(S)$ , можно сравнивать с  $P(G)$ . Если при этом  $P_G(H)=P(G)$ , то граф  $H$  изоморфен графу  $G$  и, следовательно, принадлежит классу  $G(S)$ .

#### Формирование области интеграции $W_G(S)$ и определение полного инварианта $P(G)$

Для задания множества графов можно использовать любые тривиально вычисляемые инварианты, например упомянутый выше степенной инвариант  $S$ . Все графы, у которых этот инвариант совпадает, образуют соответствующие множества  $M(S)$ . Будем считать, что степенной инвариант в виде вектора  $S$  задан и определяет множество связанных обыкновенных графов  $M(S)$ . В множестве  $M(S)$  произвольно выберем один из графов, например  $G$ , который будет представлять класс  $G(S)$ . Формирование области интеграции  $W_G(S)$  для класса графов  $G(S)$ , представленного графом  $G$  со степенным инвариантом  $S$ , производится с применением метода свободной интеграции кодов структурных различий [4]. Граф  $G=(E,U)$  представим матрицей смежности вершин  $A=\|a_{ij}\|_{n \times n}$ ,  $a_{ij}=1$ , если вершины  $e_i$  и  $e_j$  связаны ребром  $u_{ij}$ ,  $a_{ij}=0$ , в противном случае.

Введём  $n$ -мерный вектор  $D^k=\{d_i^k\}$ , элементы  $d_i^k$  которого будут соответствовать кодовым числам интегральных описателей вершин  $e_i$  на  $k$ -м шаге интеграции кодов структурных различий графа  $G$ . Если значение элемента  $d_i^k$  в векторе  $D^k$  встречается один раз, т. е. не повторяется, то такой элемент будем обозначать  $d_{i^*}^k$ . На шаге  $k=0$  все элементы  $d_i^0$  вектора  $D^0$  принимаются равными 1. Метод свободной интеграции последовательно выполняет преобразования вектора  $D^k$  в  $D^{k+1}$  до тех пор, пока

на некотором шаге  $k$  не будет получен вектор  $D^{k+1}=D$ , у которого все элементы  $d_i^{k+1}$  окажутся обозначены как  $d_{i^*}^{k+1}$ . Используемая при этом система кодирования оформляется в виде области интеграции  $W_G(S)$  для класса  $G(S)$ , представляемого графом  $G$ .

Алгоритм свободной интеграции для формирования области  $W_G(S)$  и определения полного инварианта  $P(G)$  включает следующие операции.

1. Используя операцию попарного произведения элементов двух векторов, обозначим её символом  $\otimes$ , для каждой вектор-строки  $A_i$  (вектор-столбца  $A_j$ ) выполним  $A_i \otimes D^k = Z_i(D^k) = (a_{i1}d_1^k, a_{i2}d_2^k, \dots, a_{in}d_n^k)$ . Данная операция не выполняется для  $A_j$ , которым соответствуют элементы  $d_{j^*}^k$ , внесённые в вектор  $D^k$  как виртуальные различия (см. п. 3). Нулевые значения элементов вектора  $Z_i(D^k)$  исключаются, а множество ненулевых упорядочивается по возрастанию значений и обозначается  $Z_i^k$ . В результате имеем совокупность множеств  $Z^k = \{Z_i^k\}$ .
2. Кодовые числа  $d_{i^*}^k$ , помеченные в  $D^k$  как виртуальные различия, переносятся в  $D^{k+1}$  без изменения значений. Далее для множеств  $Z_i^k \in Z^k$  назначаются кодовые числа  $d_i^{k+1}$ , которые включаются в вектор  $D^{k+1}$ . Выбор кодового числа  $d_i^{k+1}$  при очередном назначении осуществляется из общего множества чисел  $I=(1,2,\dots,n)$ . Назначение кодовых чисел выполняется таким образом, чтобы разные множества  $Z_i^k$  получили разные кодовые числа  $d_i^{k+1}$ , т. е.

$$\forall (Z_i^k, Z_j^k) \subset Z^k [(Z_i^k \neq Z_j^k) \& (i \neq j)] \Rightarrow (d_i^{k+1} \neq d_j^{k+1}).$$

Для этого последовательно анализируется каждое множество  $Z_i^k \in Z^k$ . Если  $Z_i^k$  совпадает с одним из множеств  $Z_j^k \in Z^k$ , для которого уже назначен код  $d_j^{k+1}$ , то множеству  $Z_i^k$  назначается код  $d_i^{k+1}=d_j^{k+1}$ . Если  $Z_i^k$  отличается от множеств  $Z_j^k$  с назначенными кодами  $d_j^{k+1}$ , то множеству  $Z_i^k$  назначается код  $d_i^{k+1}$  по правилу:

$$d_i^{k+1} = \min(I \setminus \tilde{I}(D^{k+1})). \quad (1)$$

Здесь  $\tilde{I}(D^{k+1})$  – множество элементов  $d_i^{k+1}$  внесённых ранее в вектор  $D^{k+1}$  на данном шаге интеграции. Код  $d_i^{k+1}$  заносится в вектор  $D^{k+1}$  и анализ очередного множества  $Z_i^k$  повторяется. Процесс заканчивается, когда всем  $Z_i^k$  будут назначены коды  $d_i^{k+1}$ . Множество кодовых чисел в векторе  $D^{k+1}$  обозначим  $I(D^{k+1})$ .

3. Выполняется анализ вектора  $D^{k+1}$ . Если  $\max(I(D^{k+1})) > \max(I(D^k))$ , то проверяется наличие  $d_{i^*}^{k+1}$ , которые в векторе  $D^{k+1}$  встречаются один раз, и они помечаются кодом  $d_{i^*}^{k+1}$ . Если  $\max(I(D^{k+1})) = \max(I(D^k))$ , то в векторе  $D^{k+1}$  выбирается группа элементов с одинаковыми значениями  $d_i^{k+1}$  и с минимальным числом элементов в этой группе. Один из элементов в выбранной группе заменяется на элемент  $d_{i^*}^{k+1}$  по правилу:

$$d_{i^*}^{k+1} = \max(I(d_i^{k+1})) + 1. \quad (2)$$

Далее выполняются действия, как и в случае соблюдения условия  $\max(I(D^{k+1})) > \max(I(D^k))$ . Назначение  $d_{i^*}^{k+1}$  по правилу (2) можно рассматривать как искусственное внесение в граф виртуального различия.

4. Область интеграции для класса графов  $G(S)$ , обозначенную как  $W_G(S)$ , представим совокупностью отдельных записей, сформированных для каждого  $k$ -го шага интеграции, в виде:

$$k = (k, k_v) : \{n_d(Z_i^k) \Rightarrow d_i^{k+1}\}; \{(Z_i^k) \Rightarrow d_i^{k+1}\}. \quad (3)$$

В записи (3) указывается шаг, равный  $k$  или  $k_v$ , если на  $k$ -м шаге интеграции использовалось очередное  $v$ -е,  $v=1, 2, \dots, V$ , назначение кода  $d_{i^*}^{k+1}$  по правилу (2). Множество  $\{n_d(Z_i^k) \Rightarrow d_i^{k+1}\}$  отражает назначение кода  $d_i^{k+1}$  по правилу (1), и при этом число множеств  $Z_i^k$  с одинаковым кодом  $d$  оказалось равным  $n_d$ . Множество  $\{(Z_i^k) \Rightarrow d_i^{k+1}\}$  отражает уникальные коды  $d_{i^*}^{k+1}$ , назначенные по правилу (1) или (2).

5. Операции 1–4 соответствуют выполнению одного  $k$ -го шага свободной интеграции кодов по преобразованию векторов  $D^k \Rightarrow D^{k+1}$  и  $k$ -й записи в область  $W_G(S)$ . Выполнение шагов повторяется для  $k=0, 1, 2, \dots, \Delta k, \Delta k \leq n$ , и заканчивается, когда в векторе  $D^{k+1}$  все элементы окажутся уникальными кодами  $d_{i^*}^{k+1}$ . Данный вектор является интегральным описателем структуры (ISD) графа  $G$  и в последующем обозначается как  $D(G) = \{d_i\}, i=1, 2, \dots, n$ .

6. На основе вектора  $D(G)$  для графа  $G$  вычисляется полный инвариант  $P(G) = \{P_i(G)\}$ . С этой целью для каждого  $d_i$  над вектор-строкой  $A_i$  графа  $G$  и вектором  $D(G)$  выполняется операция попарного произведения:  $A_i \otimes D(G) = \tilde{D}_i(G)$ . После исключения из вектора  $\tilde{D}_i(G)$  нулевых элементов и упорядочения по возрастанию ненулевых значений кодов  $d_i$  получим множество  $Z_i$ , которое, по существу, является инцидентором  $F(d_i)$  вершины абстрактной структуры графа  $G$ , поименованной уникальным кодом  $d_i$ . Запись в виде  $d_i(F(d_i))$  принимается в качестве элемента  $\tilde{P}_i(G)$  вектора  $\tilde{P}(G)$ . Упорядоченная по возрастанию значений кодов  $d_i$  последовательность элементов  $d_i(F(d_i))$  в  $n$ -мерном векторе  $\tilde{P}(G)$  является полным инвариантом  $P(G) = \{d_i(F(d_i))\}$  графа  $G$  и представляет абстрактную структуру графа, которая не зависит от исходной нумерации его вершин.

Последовательность действий при получении  $P(G)$  представим в виде:

$$A_i \otimes D(G) = \tilde{D}_i(G); \tilde{D}_i(G) \Rightarrow Z_i = F(d_i); \\ d_i(F(d_i)) \Rightarrow \tilde{P}_i(G); \{\tilde{P}_i(G)\} = \tilde{P}(G) \Rightarrow P(G). \quad (4)$$

Заметим, что элементы  $P_i(G)$  вектора  $P(G)$  могут содержать только инциденторы  $F(d_i)$ , а числовые коды  $d_i$  вершин абстрактной структуры графа  $G$  становятся избыточными, т. к. значения  $d_i$  изменяются от 1 до  $n$  и дублируют порядковые номера элементов в векторе  $P(G)$ .

В данном алгоритме коды  $D_i^k$  множествам  $Z_i^k$  назначались свободно, можно сказать произвольно, но в рамках заданных правил. Поэтому полу-

ченную систему кодирования, представленную областью  $W_G(S)$ , следует рассматривать как одну из многих возможных систем. При этом проблем с неоднозначностью кодирования здесь не возникает, т. к. система кодирования работает с множеством графов  $M(S)$ , замкнутым относительно инварианта  $S$ , и для любого графа  $H \in M(S)$  проверка наличия полного инварианта  $P_G(H) = P(G)$  осуществляется в зависимости от  $W_G(S)$ . Если найти  $P_G(H) = P(G)$  не удалось, то граф  $H$  потенциально может стать представителем другого класса  $H(S)$  с соответствующей областью  $W_H(S)$ . В этом случае принадлежность любого графа  $Q \in M(S) \setminus (G, H)$  к классам  $G(S)$  или  $H(S)$  будет определяться наличием полного инварианта  $P_G(Q)$  или  $P_H(Q)$ , вычисляемого относительно области  $W_G(S)$  или  $W_H(S)$ .

#### Проверка наличия полного инварианта $P_G(H)$ относительно области $W_G(S)$

В предыдущем разделе показано, как для графа  $G$  из множества  $M(S)$  с помощью метода ISD в условиях свободной интеграции кодов можно получить полный инвариант  $P(G)$  и область  $W_G(S)$ . При наличии  $W_G(S)$ , представляющей класс  $G(S)$ , имеется возможность проверить принадлежность любого из графов  $M(S) \setminus G$  к классу  $G(S)$ . Очевидно, что граф  $H \in M(S) \setminus G$  принадлежит классу  $G(S)$ , если его полный инвариант  $P_G(H)$ , вычисленный с использованием системы кодирования  $W_G(S)$ , будет равен  $P(G)$ . Полный инвариант  $P_G(H)$ , полученный в системе  $W_G(S)$  и равный  $P(G)$ , помечается индексом  $G$ , подчеркивая тем самым зависимое назначение кодов относительно области  $W_G(S)$ . Для проверки наличия у графа  $H$  полного инварианта  $P_G(H)$  ниже предлагается алгоритм, использующий метод ISD с зависимой интеграцией кодов.

Алгоритм поиска  $P_G(H)$  с использованием зависимой интеграции, в сравнении с алгоритмом определения  $P(G)$  на основе свободной интеграции, имеет два существенных отличия. Первое из них – это назначение кодов  $d_i^{k+1}$  множествам  $Z_i^k$  в строгом соответствии с системой кодирования  $W_G(S)$ . Второе отличие связано с изменением правила «разрушения» устойчивых групп. Если при свободной интеграции виртуальное различие вводилось для одной (любой) вершины устойчивой группы, то при зависимой интеграции все вершины устойчивой группы последовательно принимаются в качестве претендентов для введения виртуального различия.

Напомним, что при свободной интеграции для введения виртуального различия выбирается устойчивая группа с меньшим числом вершин. Такую группу обозначим  $E_d^{k_v}(G)$ . Индекс  $k_v, v=1, 2, \dots, V$ , обозначает  $v$ -й порядковый номер  $k$ -го шага, на котором вектор  $D^{k_v}(G)$  содержит устойчивые группы. При зависимой интеграции соответствующую устойчивую группу в векторе  $D^{k_v}(H)$  будем обозначать  $E_d^{k_v}(H)$ .

Алгоритм зависимой интеграции для поиска полного инварианта  $P_G(H)$  включает следующие операции.

1. Формирование множеств  $Z^k=\{Z_j^k\}$  осуществляется в полном соответствии с 1-й операцией алгоритма свободной интеграции.
2. Уникальные коды  $d_{j*}^k$ , соответствующие виртуальным различиям, переносятся в вектор  $D^{k+1}(H)$ . Назначение кодов  $d_j^{k+1}$  множествам  $\{Z_j^k\}$  производится путём копирования кодов, принятых в  $k$ -й строке системы кодирования  $W_G(S)$ . Если соответствие между всеми  $\{Z_j^k\}$  и  $W_G(S)$  достигнуто, а вектор  $D^{k+1}(H)\neq D(H)$ , то относительно  $D^{k+1}(H)$  выполняются операции 1 и 2. При условии, что  $D^{k+1}(H)=D(H)$ , т. е.  $D^{k+1}(H)$  содержит только  $d_{j*}^{k+1}$ , алгоритм переходит к выполнению операции 4.
- Отсутствие соответствия между  $Z_j^k$  и  $W_G(S)$  означает, что вектор  $D^{k+1}(H)$  получить не удалось и процесс зависимой интеграции на  $k$ -м шаге прерывается. Далее выполняется операция 3.
3. Процесс зависимой интеграции делает «обратный ход». Для этого в цепи переходов от  $D^0(H)$  к  $D^k(H)$  производится поиск вектора  $D^{h_k}(H)$  с наибольшим значением индекса  $h$ , т. е. последний  $D^{h_k}(H)$  в цепи переходов. При этом возможны три ситуации:
  - а) Вектор  $D^{h_k}(H)$  не найден, т. е. обратный ход заканчивается на векторе  $D^0(H)$ . Это означает, что граф  $H$  не имеет полного инварианта  $P_G(H)$ , т. е. не принадлежит классу  $G(S)$ . В этом случае алгоритм заканчивает работу.
  - б) Вектор  $D^{h_k}(H)$  найден, но в устойчивой группе  $D_d^{h_k}(H)=D_d^{h_k}(G)$  всем вершинам  $e_j\in D_d^{h_k}(H)$  виртуальные различия уже назначались. В этом случае выполнение операции 3 повторяется, т. е. обратный ход продолжается с целью поиска вектора  $D^{h_k}(H)$ .
  - в) Вектор  $D^{h_k}(H)$  найден и в группе  $D_d^{h_k}(H)$  имеется вершина  $e_j$ , которой виртуальное различие не назначалось. Вершине  $e_j\in D_d^{h_k}(H)$  согласно  $W_G(S)$  назначается виртуальное различие, и процесс интеграции продолжает работу с вектором  $D^{h_k}(H)$ , т. е. выполняются операции 1 и 2.
4. Для вектора  $D_G(H)$  вычисляется полный инвариант  $P_G(H)$ . При этом последовательность действий соответствует записи (4), и выполняются они аналогично операции (6) в алгоритме свободной интеграции для графа  $G$ . На этом алгоритм заканчивает работу.

С помощью данного алгоритма вычисляется полный инвариант  $P_G(H)$  при условии, что он существует для графа  $H$ . Полный инвариант  $P_G(H)$  соответствует определенной подстановке изоморфизма графов  $G$  и  $H$ . В общем случае для этих графов могут существовать и другие варианты подстановок изоморфизма. Если выделение таких подстановок актуально, то после вычисления  $P_G(H)$  следует перейти к операции 3, делая «обратный ход» уже в цепи переходов от  $D^0(H)$  к  $D^{k+1}(H)=D_G(H)$ .

Примеры схем поиска полных инвариантов при свободной и зависимой интеграции кодов

структурных различий приведен на рис. 1. На рис. 1, а показана цепь переходов для графа  $G$  от вектора  $D^0(G)$  до вектора  $D(G)$  и соответствующего полного инварианта  $P(G)$ . В цепи выделены только векторы  $D^{h_k}$  и устойчивые группы  $E_d^{h_k}(G)$ , выбранные для введения виртуальных различий. Принятая при этом система кодирования отражается в  $W_G(S)$ .

Схема поиска  $P_G(H)$  относительно  $W_G(S)$  показана на рис. 1, б. Здесь короткие дуги, выходящие из вершин устойчивых групп, указывают, что введенное виртуальное различие не привело к успеху, т. е. возникло несоответствие между  $Z_j^k$  и  $W_G(S)$  и потребовался «обратный ход». Длинные дуги означают, что очередной вектор  $D^{h_k}(H)$  или  $D_G(H)$  достигнуть удалось.

Рис. 1, в отражает выполнение «обратного хода» для всех неуспешных и успешных продвижений процесса интеграции (короткие и длинные дуги). В данном случае схема отражает перебор всех цепей переходов относительно системы кодирования  $W_G(S)$ . Такой перебор соответствует предельному объему вычислений при поиске интегрального описателя  $D_G(H)$  и соответствующего полного инварианта  $P_G(H)$ . Полиномиальность оценки сложности данного перебора показана в [6] и легко подтверждается примером на рис. 1, в.

Из рис. 1, в следует, что в графе  $H$  относительно  $W_G(S)$  полный инвариант  $P_G(H)$  найден для трёх вариантов подстановок изоморфизма (автоморфизмов), соответствующих интегральным описателям  $D_G^a(H)$ ,  $D_G^b(H)$ ,  $D_G^c(H)$ . В случае, если граф  $H\notin G(S)$ , т. е. для него не существует  $P_G(H)=P(G)$ , схему поиска  $P_G(H)$  с перебором всех цепей, аналогичную рис. 1, в, можно использовать для анализа сходства графов  $G$  и  $H$ . Изучение этих возможностей требует отдельных исследований. Некоторые вопросы по проблеме сходства двух графов на основе метода ISD были рассмотрены в работе [5].

#### Примеры получения области интеграции и полных инвариантов

Работу алгоритма формирования области интеграции  $W_G(S)$  и получения полного инварианта  $P(G)$  покажем на примере однородного графа  $G$  из класса графов  $G(S)$  с  $n=10$  и степенью вершин  $S=3$ . Для получения полного инварианта однородные графы представляют наибольшую сложность, поэтому в качестве примера выбран граф данного класса. В верхней части рис. 2 представлен граф  $G$  в виде матрицы  $A$  и процесс получения вектора  $D(G)$  и данных для формирования записей (3) в область интеграции кодов  $W_G(S)$ .

Элементы в множествах  $Z_i^h$  на рис. 2 не разделены запятыми. В данном случае это не вносит путаницу, т. к. все элементы являются одноразрядными числами. Для получения вектора  $D(G)=D^{h=8}$  потребовалось 8 шагов интеграции кодов. Правило (2) применялось дважды – для вектора  $D^{h_1}$  (назначен код  $d_{1*}^1=2$ ) и для вектора  $D^{h_2}$  (назначен код  $d_{2*}^2=8$ ). Область интеграции  $W_G(S)$  для графов рас-

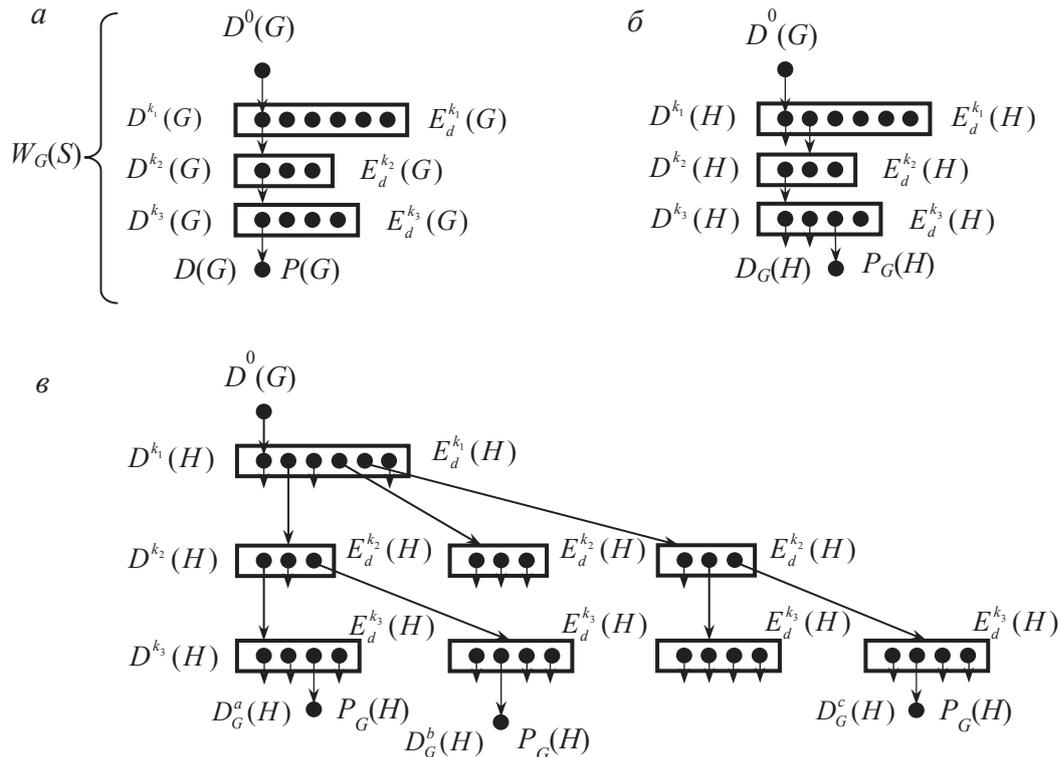


Рис. 1. Схемы поиска полных инвариантов при свободной и зависимой интеграции

смагриваемого класса  $G(S)$ , полученная на примере графа  $G$ , имеет следующий вид:

- $k_1 = 0$ :  $10(1,1,1) \Rightarrow 1$ ;
- $k_1 = 1$ :  $9(1,1,1) \Rightarrow 1; (1,1,1) \Rightarrow 2^*$ ;
- $k = 2$ :  $3(1,1,2) \Rightarrow 1; 6(1,1,1) \Rightarrow 3$ ;
- $k = 3$ :  $2(1,2,3) \Rightarrow 1; 4(1,3,3) \Rightarrow 3$ ;  
 $2(3,3,3) \Rightarrow 4; (2,3,3) \Rightarrow 5$ ;
- $k = 4$ :  $2(1,2,3) \Rightarrow 1; 2(1,3,4) \Rightarrow 3$ ;  
 $2(3,3,4) \Rightarrow 4; (2,3,3) \Rightarrow 5; 2(3,4,5) \Rightarrow 6$ ;
- $k = 5$ :  $2(1,2,3) \Rightarrow 1; 2(1,4,6) \Rightarrow 3; (3,5,4) \Rightarrow 4$ ;  
 $(2,6,6) \Rightarrow 5; 2(3,4,5) \Rightarrow 6; (4,6,6) \Rightarrow 7$ ;
- $k_2 = 6$ :  $(1,2,3) \Rightarrow 1; 2(1,4,6) \Rightarrow 3$ ;  
 $(3,3,7) \Rightarrow 4; (2,6,6) \Rightarrow 5; 2(3,5,7) \Rightarrow 6$ ;  
 $(4,6,6) \Rightarrow 7; (1,2,3) \Rightarrow 8^*$ ;
- $k = 7$ :  $(4,6,8) \Rightarrow 1; (3,3,7) \Rightarrow 3; (1,4,6) \Rightarrow 4$ ;  
 $(2,3,8) \Rightarrow 5; (2,6,6) \Rightarrow 6; 2(3,5,7) \Rightarrow 7$ ;  
 $(4,6,6) \Rightarrow 9$ ;
- $k = 8$ :  $(3,7,8) \Rightarrow 1; (1,4,9) \Rightarrow 3; (3,5,7) \Rightarrow 4$ ;  
 $(2,4,8) \Rightarrow 5; (2,7,7) \Rightarrow 6; (1,6,9) \Rightarrow 7$ ;  
 $(3,7,7) \Rightarrow 9; (4,6,9) \Rightarrow 10$ .

После вычисления согласно (4) вектора  $\tilde{P}(G)=\{d_i(F(d_i))\}$ , упорядочения в нём элементов  $d_i(F(d_i))$  относительно значений кодов  $d_i$  получим

полный инвариант графа  $G$  в виде:  $P(G)=(1(3,7,8), 2(5,6,8), 3(1,4,9), 4(3,5,10), 5(2,4,8), 6(2,7,10), 7(1,6,9), 8(1,2,5), 9(3,7,10), 10(4,6,9))$ .

Область интеграции не зависит от нумерации вершин и представляет собой иерархическую систему кодирования, которая используется в качестве эталона при выполнении алгоритма зависимой интеграции кодов для всех графов рассматриваемого класса. При этом для графов, изоморфных графу  $G$ , этот эталон соблюдается, а для неизоморфных – нет. Покажем это на примере двух графов  $H$  и  $Q$ , и определим их принадлежность классу  $G(S)$ , представленному графом  $G$ . В данном случае назначение кодов в ходе работы алгоритма интеграции должно производиться не по правилам (1) и (2), а в строгом соответствии с системой кодирования области интеграции  $W_G(S)$ , полученной ранее для заданного класса  $G(S)$ .

Для графа  $H$  (средняя часть рис. 2) после назначения по правилу (2) в вектор  $D^{k_1}$  кода  $d_{1^*}^1=2$  уже на 3-м шаге интеграции обнаружилось структурное различие, которое не соответствует записи в  $W_G(S)$ . Вторая попытка с назначением  $d_{2^*}^1$  оказалась успешной, т. е. процесс интеграции прошел в соответствии с  $W_G(S)$ , в том числе и с учётом назначения по правилу (2) кода  $d_{2^*}^1=8$ . Полный инвариант  $P_G(H)$ , полученный на основе вектора  $D_G(H)$ , в соответствии с правилами (4) совпадает с  $P(G)$ . Из этого следует, что граф  $H$  изоморфен графу  $G$ , а сопоставляя в векторах  $D(G)$  и  $D_G(H)$  коды  $d_i$ , получим подстановку изоморфизма:  $1(3,9), 2(1,2), 3(4,10)$ ,

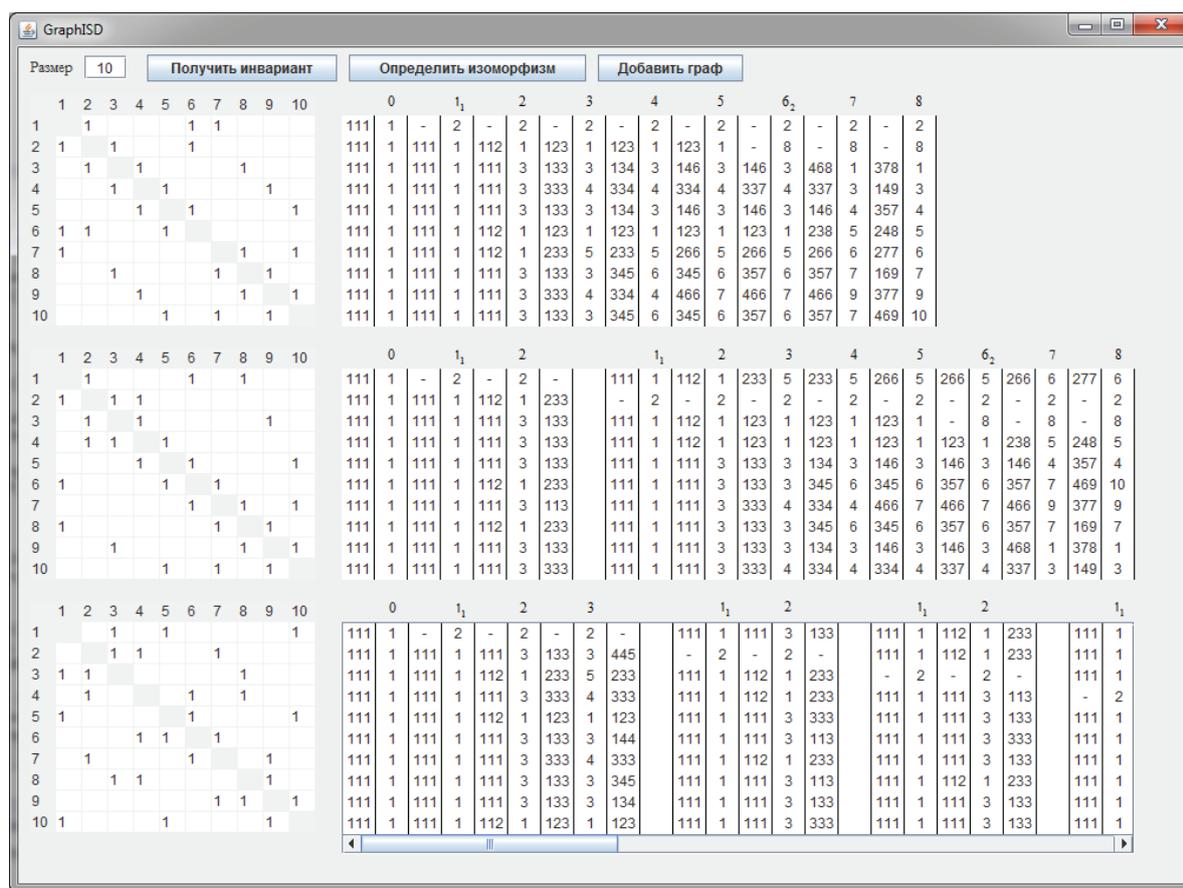


Рис. 2. Примеры работы алгоритмов свободной и зависимой интеграции кодов структурных различий

4(5,5), 5(6,4), 6(7,1), 7(8,8), 8(2,3), 9(9,7), 10(10,6). В подстановке перед скобками указаны значения кодов  $d_i$ , в скобках на первом месте указан номер вершины графа  $G$ , а на втором – графа  $H$ .

На рис. 3 представлена абстрактная структура графов  $G$  и  $H$ , построенная на основе инциденторов  $F(d_i)$ , содержащихся в полном инварианте  $P(G)=P_c(H)$ . Вершины данной структуры обозначены кодами  $d_i$  с указанием соответствующих пар вершин подстановки.

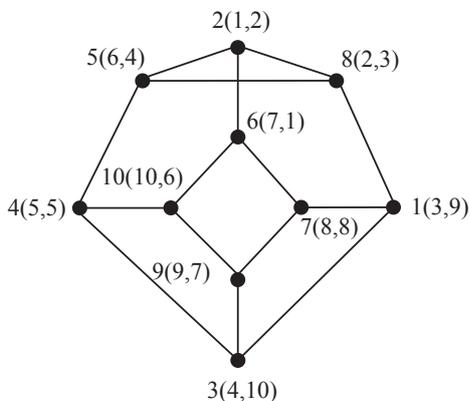


Рис. 3. Абстрактная структура графов  $G$  и  $H$

Заметим, что на основе полного инварианта может быть построена только абстрактная структура графа, а для установления соответствия между вершинами структуры и вершинами графа необходимо использовать векторы  $D(G)$  и  $D_c(H)$  или  $\tilde{P}(G)$  и  $\tilde{P}_c(G)$ .

Для графа  $Q$  (нижняя часть рис. 2) попытки получить полный инвариант  $P_c(Q)=P(G)$  путём интеграции кодов относительно области  $W_c(S)$  не привели к успеху. На рис. 2 приведены 3 попытки назначения кодов  $d_{1^s}^1=2$ ,  $d_{2^s}^1=2$ ,  $d_{3^s}^1=2$ . В первой из них структурные различия обнаружены на шаге  $k=4$ , а в двух последних – на шаге  $k=3$ . Все последующие попытки назначения кодов  $d_{i^s}^1=2$ ,  $i=4,5,\dots,10$  (на рис. 2 не показаны) также не привели к успеху. В частности, для  $d_{10^s}^1=2$  структурные различия обнаружились только на шаге  $k=5$ . Из этого следует, что у графа  $Q$  отсутствует полный инвариант  $P_c(Q)=P(G)$ , т. е. граф  $Q$  неизоморфен графам  $G$  и  $H$ . Для графа  $Q$ , как и для графа  $G$ , может быть получен инвариант  $P(Q)\neq P(G)$  с соответствующей областью интеграции  $W_q(S)$ . В классе  $Q(S)$  поиск графов с полными инвариантами, равными  $P(Q)$ , следует вести относительно области  $W_q(S)$ .

**Заключение**

В статье предложен алгоритм решения одной из наиболее сложных задач теории графов – вычисление полного инварианта графа. Алгоритм характеризуется простотой, высокой эффективностью и имеет полиномиальную оценку предельного объема вычислений. Полный инвариант удалось получить на основе интегрального описателя структуры графа, и поэтому вопросы поиска и существования алгоритма вычисления полного инварианта в виде количественной меры остаются открытыми. Результаты исследований, полученные в данной работе, по-видимому, добавят оптимизма, а возможно и окажут помощь в поиске ответов на эти вопросы. Однако здесь необходимо иметь ввиду следующее обстоятельство. Если полные инварианты в виде количественной меры будут способны лишь определять наличие изоморфизма, то ценность таких ин-

вариантов невелика, т. к. изоморфизм легко определяется методом интеграции структурных различий. Дело в том, что при получении полных инвариантов на основе интегральных описателей ценными являются не столько сами инварианты, сколько соответствующие процессы интеграции кодов структурных различий. При этом непосредственно инварианты определяют наличие изоморфизма, выступают в роли описателей абстрактной структуры графов, содержат информацию о подстановке изоморфизма, а по процессам интеграции можно судить о сходстве графов на каждом шаге интеграции, выделять и при необходимости интерпретировать структурные различия, однородные и устойчивые группы, анализировать другие, сопутствующие процессу интеграции, признаки.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука».*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Зыков А.А. Основы теории графов. – М.: Вузовская книга, 2004. – 664 с.
2. Дэмер М., Эммерт-Штрайб Ф., Цой Ю. Р., Вармуза К. Новый функционал информативности для анализа структуры химических графов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 5. – С. 5–11.
3. Погребной Ан.В., Погребной В.К. Инвариант графа на основе компактных подграфов и алгоритм его вычисления // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5. – С. 200–204.
4. 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.
5. Погребной В.К. Задача определения оценок сходства структур двух графов на основе выделения общих частей // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5. – С. 194–199.
6. Погребной В.К., Погребной Ан.В. Исследование полиномиальности метода вычисления интегрального описателя структуры графа // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 146–151.

*Поступила 03.09.2013 г.*

UDC 519.171.1

## POLYNOMIAL ALGORITHM OF COMPUTING COMPLETE GRAPH INVARIANT ON THE BASIS OF INTEGRAL STRUCTURE DESCRIPTOR

V.K. Pogrebnoy, An.V. Pogrebnoy

Tomsk Polytechnic University

*The relevance of the research is caused by the unsolved problem of searching for the complete graph invariant and polynomial algorithm for its computing. The aim of the research is in determining the complete invariant of an ordinary graph on the basis of integral descriptor of abstract structure and in developing the efficient algorithm for computing the complete invariant. The techniques of the research are based on the graph theory and the theory of structural differences code integration in abstract graph structures. The authors have proposed the algorithm for solving one of the most complex problems of graph theory. It is the computation of complete graph invariant. The algorithm is based on the methods of free and dependent integration of structural differences codes in a graph; it is characterized by simplicity, efficiency and it has polynomial estimation of the limiting amount of computation. The complete invariant is represented in the form of a vector of integral descriptor for graph abstract structure vertices and contains information for forming isomorphism substitution. Using Java the GraphISD software was developed implementing the proposed algorithm. The paper introduces the examples of computing the complete invariants at free and dependent integration.*

**Key words:**

*Complete graph invariant, graph isomorphism, integral structure descriptor, abstract graph structure, code integration area, polynomial algorithm.*

## REFERENCES

1. Zykov A.A. *Osnovy teorii grafov* [Graph theory bases]. Moscow, Vuzovskaya kniga, 2004. 664 p.
2. Demer M., Emmert-Shtrayb F., Tsoy U.P., Varmuza K. Noviy funktsional informativnosti dlya analiza struktury khimicheskikh grafov [A new information content functional to analyze the structure of kinetic graphs]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no 5, pp. 5–11.
3. Pogrebnoy An.V., Pogrebnoy V.K., Invariant grafa na osnove kompaktnykh podgrafov i algoritm ego vychisleniya [Graph invariant on the basis of compact subgraph and algorithm for its computation]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 5, pp. 200–204.
4. Pogrebnoy V.K. Metod integratsii strukturnikh razlichii v grafovyykh modelyakh i ego primeneniye dlya opisaniya struktur [Methods of integration of structural differences in graph models to describe structures]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 10–16.
5. Pogrebnoy V.K. Zadacha opredeleniya otsenok skhodstva struktur dvukh grafov na osnove vydeleniya obshchikh chastei [The task of estimating the similarity of two graphs structures on the basis of general parts definition]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no 5, pp. 194–199.
6. Pogrebnoy V.K., Pogrebnoy An.V. Issledovanie polinomialnosti metoda vychisleniya integralnogo opisatelya strukturi grafa [Studying the polynomiality of computation technique for integrated descriptor of graph structure]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. xx–xx.

УДК 004.032.24

## РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ГРАФИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

А.Ю. Демин, В.А. Дорофеев

Томский политехнический университет

E-mail: ad@tpu.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью исследования возможности распараллеливания алгоритмов на основе структурно-графического представления.

**Цель работы:** Распараллелить алгоритм нахождения границ на аэрофотоснимках с помощью структурно-графической формы.

**Методы исследования:** Обработка растровых изображений в интеллектуальных системах навигации и управления с помощью линейных фильтров. Представление алгоритмов в графовой форме: дерева операторов, блок-схемы, графа потока данных. Проектирование программных средств с помощью средств платформы .Net библиотеки Task Parallel Library.

**Результаты:** В работе рассматривается программная реализация алгоритма нахождения границ объектов на изображениях с помощью оператора Собеля. Программная реализация представлена в структурно-графической форме. Предложен полуавтоматический способ распараллеливания рассматриваемой программной нагрузки. Программно реализован распараллеленный алгоритм, и проведен анализ эффективности распараллеливания для различных изображений.

**Ключевые слова:**

Оператор Собеля, обработка изображений, дерево операторов, граф потока данных, распараллеливание программ.

### Введение

Интеллектуальные системы навигации и управления (ИСНУ) должны обладать современными средствами связи и мониторинга, обеспечивающими сбор, накопление и обработку информации, поступающей с подвижных и стационарных, в том числе труднодоступных, объектов, выработку решений и оперативную доставку команд управления на все уровни и на все объекты, осуществлять автоматизированное документирование информационных обменов, результатов обработки информации и принятых решений, обеспечивать непрерывный мониторинг состояния объектов, отображение местоположения и маршрутов движения мобильных групп и подвижных объектов на электронных картах диспетчерских пунктов в реальном масштабе времени и целый ряд других функций [1].

Использование спутниковых и аэрофотоснимков, изображений, получаемых с беспилотных ле-

тательных аппаратов, позволило в телекоммуникационных технологиях существенно улучшить возможности построения аппаратно-программных комплексов для сопровождения, мониторинга и управления мобильными объектами [2].

Важной задачей при анализе изображений, полученных с различных подвижных и труднодоступных объектов, в том числе со спутников, является проблема распознавания различных объектов, таких как различные водоемы (реки, озера, водохранилища, затопленные территории), площади выгоревших лесов, промышленные и гражданские объекты и т. д. Решение подобных задач актуально при построении ИСНУ для Авиалесоохраны РФ, Россельхознадзора РФ, Росгидромета РФ и гидрометов стран СНГ, различных служб МЧС и силовых ведомств.

С другой стороны, изображения, получаемые со спутников и других объектов, характеризуются большим объемом данных. Так, файл с одним

спутниковым снимком может иметь размер в несколько гигабайт. Этот факт показывает необходимость разработки эффективных методов обработки таких изображений с привлечением высокопроизводительных и многоядерных аппаратных средств, в том числе суперкомпьютеров.

**Нахождение границ с помощью разностных фильтров**

Одним из этапов распознавания образов в системах компьютерного зрения может выступать алгоритм нахождения границ с помощью разностных фильтров. При этом используют семейство операторов пространственного дифференцирования, применяемых для вычисления приближенных значений градиента яркости изображения. Результатом применения такого оператора в каждой точке изображения является либо вектор градиента яркости в этой точке, либо его норма [3].

В каждом пикселе градиент показывает направление наибольшего увеличения яркости. Длина вектора градиента определяет величину изменения яркости, а значит, вероятность нахождения точки на границе.

Одним из способов нахождения границ на изображении является реализация фильтра или оператора Собеля (Sobel) [3], который позволяет найти неточное приближение градиента яркости изображения. Достоинством оператора Собеля является наилучшая реакция на ступенчатый перепад и наименьший коэффициент утолщения контурной линии [4].

Формально оператор Собеля определяется следующим образом:

Пусть  $A$  – исходное изображение, а  $G_x$  и  $G_y$  – два изображения, где каждая точка содержит приближенные производные по  $x$  и по  $y$ . Они вычисляются следующим образом [3]:

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * A, \quad G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * A, \quad (1)$$

где  $*$  обозначает двумерную операцию свертки. Двухмерная операция свертки проводится по формуле:

$$B(x, y) = \sum_i \sum_j F(i, j) \cdot A(x + i, y + j), \quad (2)$$

где  $F(i, j)$  – ядро фильтра (в случае оператора Собеля это матрицы  $3 \times 3$ , представленные выше (1)).

Величину градиента в каждом пикселе изображения можно вычислить следующим образом.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (3)$$

Направление градиента определяется так:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right).$$

Операции свертки  $G_x$  и  $G_y$  можно использовать отдельно для нахождения вертикальных и горизонтальных границ.

**Структурно-графическое представление программной реализации оператора Собеля**

Исходные данные для программной реализации представляют собой массив байт – значений яркостей пикселей (в случае полутонового изображения), либо значений яркостей отдельных каналов в случае использования различных цветовых моделей. В случае использования RGB модели используется классическое расположение данных для формата bmp в памяти попиксельно (B1 G1 R1 B2 G2 R2 ...).

Программная реализация оператора Собеля для одноядерного процессора является тривиальной задачей и на псевдокоде выглядит следующим образом:

```
for all y
    for all x
        Sobel compute
```

Здесь внешний цикл организует перебор всех строк исходного изображения, а внутренний цикл – перебор всех пикселей в строке. Тело циклов Sobel compute вычисляет значение по Собелю для одного пикселя и на псевдокоде представляется также двумя вложенными циклами:

```
for all i
    for all j {
        Gx compute
        Gy compute
        G compute
    }
```

Здесь оба цикла организуют перебор в окрестности точки и вычисления двумерной операции свертки (2). В теле циклов вычисляются приближенные производные по  $x$  и по  $y$  (1) и величина  $G$  (3).

Для анализа и представления программной реализации используем способ, описанный в [5]. Данный способ позволяет анализировать текст программы и представить программную нагрузку в виде взаимосвязанных деревьев (дерева операторов, дерева данных, дерева функций и т. д.), графа управляющих связей, графа потока данных.

Вычисление значений по Собелю для одного пикселя представим в виде дерева операторов, представленного на рис. 1.

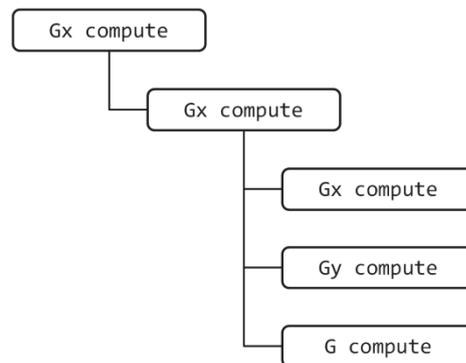


Рис. 1. Дерево операторов для вычисления цвета одного пикселя

Исходя из представления в виде дерева по алгоритму, изложенному в [5], получим блок-схему (рис. 2).

**Определение 1.** Блок-схема – это ориентированный граф  $H=(NU, n_0)$  с вершинами специального вида, соответствующий условиям:

1. Граф  $G$  имеет единственную входную вершину  $n_0$ , и в эту вершину не входит ни одна дуга.
2. Граф  $G$  не содержит параллельных дуг и петель.
3. Конечное множество дуг  $U=\{u_{ij}\}, f=1, \dots, F$ , отражает отношение предшествования по выполнению между операторами программы.
4. Конечное множество вершин  $N=\{n_{\mu}\}, \mu=0, \dots, M$ , представляет совокупность операторов  $B=\{b_{\mu}\}, \mu=0, \dots, M$ , программы. Между ними существует взаимно однозначное соответствие, (каждая вершина представляет только один оператор программы и, наоборот, каждый оператор программы в графе представляется только одной вершиной).
5. Конечное множество вершин  $N=\{n_{\mu}\}, \mu=0, \dots, M$ , представляет совокупность сложно-составных операторов  $B'=\{b'_{\mu}\}, \mu=0, \dots, M$ , программы. Между ними существует взаимно однозначное соответствие. Поскольку любой вершине  $n_{\mu}$  соответствует сложно-составной оператор, то она представляет группу простых операторов.

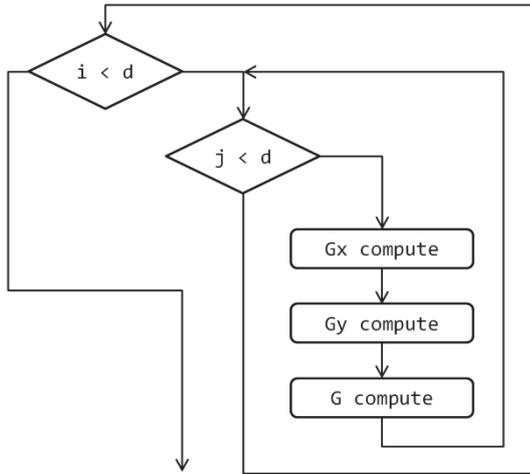


Рис. 2. Блок-схема функции для вычисления цвета одного пикселя

По алгоритму, представленному в [5], получим граф потока данных (ГПД) для программной функции вычисления цвета пикселя по Собелю (рис. 3).

**Определение 2.** Графом потока данных (ГПД) называется ориентированный граф  $R=(N, D, U)$ , где  $N$  – множество вершин, соответствующих сложно-составным операторам, представленных листьями в динамически строящемся дереве;  $D$  – множество вершин, соответствующих данным, используемым в программе, причем единице данных могут быть поставлены в соответствие несколько вершин;  $U$  – множество таких дуг, что  $\exists (d_i, n_j) \in U$ , если  $d_i \in D$  используется в  $n_j \in N$ , либо если  $d_i \in D$  изменяется в  $n_j \in N$ .

**Определение 3.** Множество вершин  $N$  из  $R$ , соответствующих сложно-составным операторам, назовем *переходами*, а множество вершин  $D$  из  $R$ , соответствующих данным, назовем *позициями*.

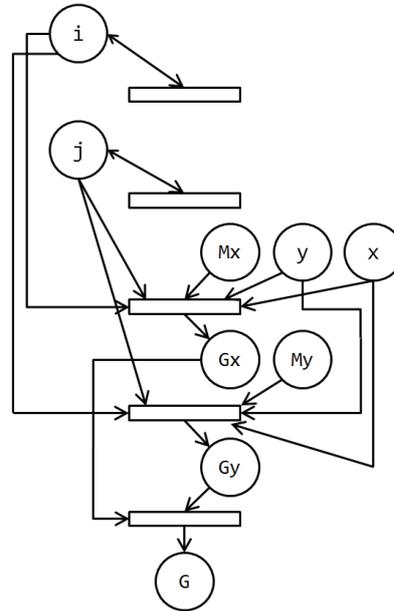


Рис. 3. ГПД для вычисления цвета одного пикселя

**Определение 4.** Подмножества  $\Omega_i$  множества  $O$  называются *ярусами*. Множество операторов  $\Omega_1$  первого яруса тождественно множеству операторов, которые информационно независимы. Множество операторов  $\Omega_2$  второго яруса тождественно множеству операторов, информационно зависимых хотя бы от одного оператора первого яруса. Множество операторов  $\Omega_i$   $i$ -го яруса тождественно множеству операторов, информационно зависимых хотя бы от одного оператора  $(i-1)$ -го яруса. Также для любого яруса выполняются условия  $Zi\Omega_i \neq \emptyset, \Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset (i \neq j)$

**Определение 5.** ГПД, соответствующий упорядочиванию функциональных операторов по ярусам, отвечающим подмножествам  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_i, \dots$  множества  $O$ , называется ГПД в *ярусно-параллельной форме* (ЯПФ).

Для анализа возможности распараллеливания перестроим ГПД в ЯПФ (рис. 4.) по следующему алгоритму.

#### Алгоритм 1. Алгоритм перестроения ГПД в ЯПФ

**Шаг 1.** Упорядочить множество переходов  $N$  так, чтобы каждый переход занимал свой отдельный ярус с 0 по  $N$ . И чтобы их порядок не противоречил порядку выполнения соответствующих операторов. Установить  $i=1$ .

**Шаг 2.** Пронумеровать все переходы в соответствии с занимаемыми ярусами.

**Шаг 3.** Если для перехода  $n_i$  выполняется условие  $\Gamma^+(n_i) \cap \Gamma^-(n_i) \neq \emptyset$  для любого  $n_i$ , принадлежащего предшествующему ярусу, то перейти к шагу 9.

**Шаг 4.** Если для перехода  $n_i$  выполняется условие  $\Gamma^+(n_i) \cap \Gamma^-(n_i) \neq \emptyset$  для любого  $n_i$ , принадлежащего предшествующему ярусу, то перейти к шагу 9.

**Шаг 5.** Если для перехода  $n_i$  выполняется условие  $\Gamma(n_i) \cap \Gamma^+(n_i) \neq \emptyset$  для любого  $n_i$ , принадлежащего предыдущему ярусу, то перейти к шагу 9.

**Шаг 6.** Исключить переход  $n_i$  с яруса, к которому он принадлежал  $\Omega_k = \Omega_k \setminus n_i$ . Включить переход  $n_i$  на предыдущий ярус  $\Omega_{k-1} = \Omega_{k-1} \cup n_i$ .

**Шаг 7.** Если ярус, на котором находился переход  $n_i$ , пуст ( $\Omega_k = \emptyset$ ), то удалить ярус  $\Omega_k$  из списка ярусов.

**Шаг 8.** Перейти к шагу 3.

**Шаг 9.** Увеличить  $i$  ( $i=i+1$ ). Если  $i > |N|$ , то перейти к шагу 10, иначе перейти к шагу 3.

**Шаг 10.** Конец.

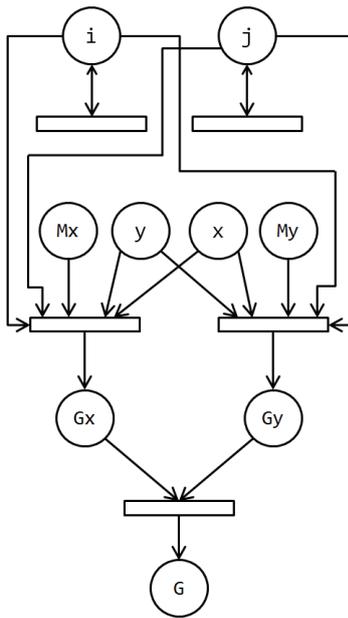


Рис. 4. ГПД в ЯПФ для вычисления градиента в указанной точке

Представление программы в виде ГПД в ЯПФ показывает отсутствие обратных внутренних связей по данным в теле циклов, что допускает принципиальную возможность параллельного выполнения этих вычислений. Максимальное число процессоров в этом случае равно девяти. Однако большие временные затраты на организацию запуска вычислительных процессов на этом уровне делают нецелесообразным распараллеливание этой подпрограммы.

Исследуем подпрограмму вычисления оператора Собеля на всем изображении. Данные вычисления, как показано выше, организуются также через два вложенных цикла по  $x$  и по  $y$ . Исследовав данный код с помощью представления деревом операторов, блок-схемы, ГПД в ЯПФ, получим аналогичные результаты возможности распараллеливания путем разбиения на  $n$  вычислительных процессов. Каждый вычислительный процесс может выполняться одновременно с другими на своем ядре и обрабатывать участок изображения из  $k$  строк. Таким образом, изображение, состоящее из  $y$  строк, разбивается на  $n$  горизонтальных областей из  $k$  строк. Каждая область обрабатывается параллельно.

### Программная реализация

Для программной реализации алгоритма Собеля был выбран язык C# и библиотека Task Parallel Library (TPL), которая входит в состав платформы .NET начиная с версии 4.0.

Поскольку данная задача реализует достаточно простой алгоритм, но при этом работает с большим изображением, то логичным выбором было осуществить распараллеливание программы с помощью декомпозиции по данным. Однако стандартные классы .NET не поддерживают общий доступ из нескольких потоков, поэтому извлечение данных из изображения для потоков осуществлялось заранее с помощью стандартных средств классов .NET для работы с внутренним представлением графических данных (операции LockBits класса Bitmap). Таким образом, потоки обращались уже к простому массиву с компонентами цветового изображения, представленными байтами  $R$ ,  $G$  и  $B$ . Это позволило избежать существенного снижения производительности, которое неизбежно возникает при использовании стандартных методов обращения к пикселям изображения.

Поскольку каждый пиксель представлен тремя байтами, не предпринималось дополнительных усилий по оптимальному размещению данных в памяти. Результирующее изображение также формировалось в виде битового массива в памяти, а по окончании вычислений преобразовывалось в изображение. Время, затрачиваемое на эти дополнительные операции, не включалось в общее время расчётов.

Для декомпозиции по данным общее количество строк изображения разбивалось на требуемое количество потоков, и каждый поток получал свои граничные значения, исходя из которых и производил обработку. Небольшой особенностью распределения стал размер массива с коэффициентами: поскольку в общем случае линейной фильтрации возможно использование не только ядра  $3 \times 3$ , но и ядер размерностью  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$  и т. д., необходимо корректировать и отступ первого и последнего потоков от края изображения. Новый поток создаётся, получает границы своей области и сразу запускается.

В результате выполнения программы из исходного изображения со спутникового снимка было получено изображение с выделенными объектами. На завершающем этапе обработки изображения использовалась пороговая фильтрация (рис. 5).

### Анализ эффективности параллельного выполнения алгоритма определения границ

Для оценки эффективности распараллеливания данной задачи были выполнены тестовые запуски с разным количеством потоков. Запуски производились на типовой рабочей станции, оснащённой процессором второго поколения Intel Core i7-2600 с 8 Гб оперативной памяти. Чтобы минимизировать вклад сторонних факторов в общие результаты, каждый тест выполнялся 10 раз, полу-

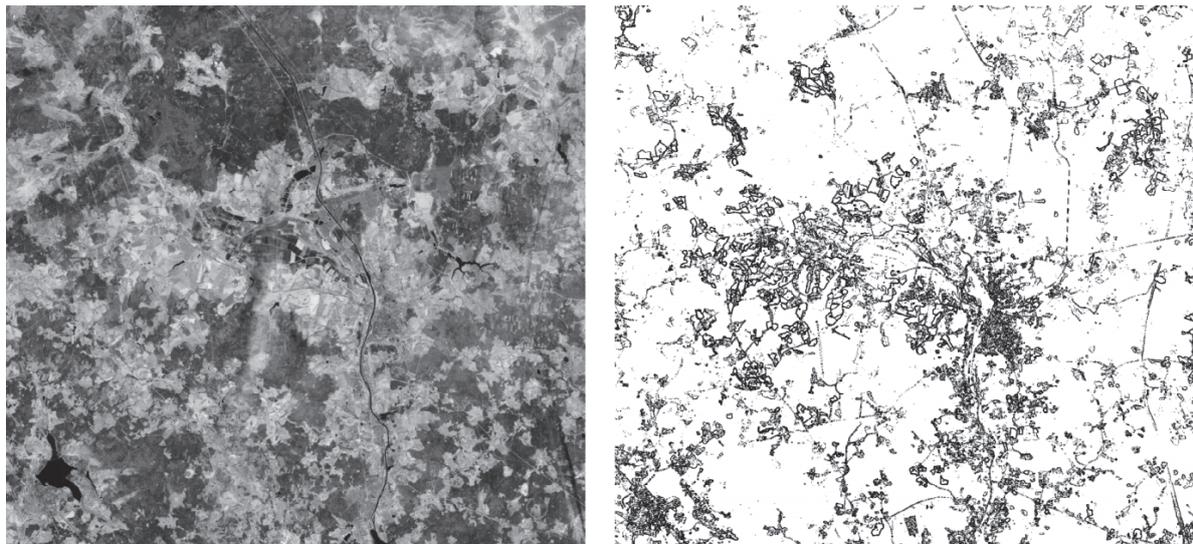


Рис. 5. Исходное изображение и полученный результат

ченное время усреднялось. Полученные результаты представлены на рис. 6.

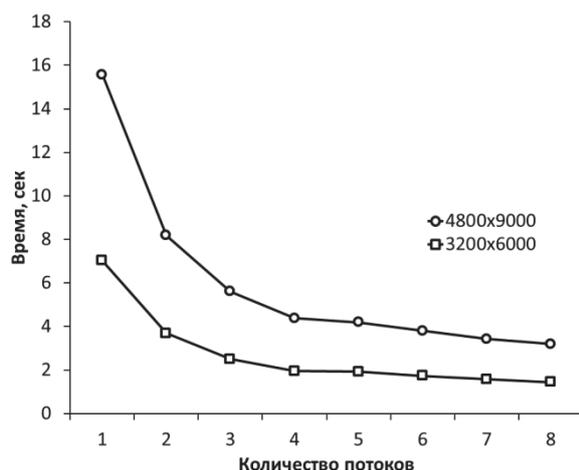


Рис. 6. Графики зависимости влияния многопоточности на обработку изображения

Как видно из графиков, максимальный прирост производительности обеспечивается при переходе от однопоточности к двум потокам: время обработки сокращается примерно в два раза. Каждый последующий поток также увеличивает производительность, но уже не так сильно: вероятно, сказываются аппаратные блокировки потоков при обращении к общей памяти. Из-за большого объема исходного изображения принцип локальности не работает и ядрам процессора приходится часто копировать новые фрагменты данных в кэш.

Стоит отметить, что при задействовании дополнительных ядер наблюдается более существенный

прирост производительности при работе с изображениями большего размера. Это вызвано дополнительными «накладными расходами» на организацию работы самих потоков.

Поскольку для тестирования использовался четырехядерный процессор, то начиная с пяти потоков выигрыш в производительности становится крайне незначительным (однако по-прежнему есть благодаря технологии гиперпоточности, присутствующей в процессорах компании Intel).

#### Заключение

1. Исследован алгоритм вычисления оператора Собеля. Программа, реализующая алгоритм, представлена в структурно-графической форме: в виде дерева операторов, блок-схем вычислительных функций, графа потока данных.
2. Предложен алгоритм перестроения графа потока данных в ярусно-параллельную форму, что позволило исследовать возможность распараллеливания программного кода. Таким образом, реализован полуавтоматический метод распараллеливания программ.
3. С помощью библиотеки Task Parallel Library программно реализована распараллеленная версия алгоритма, реализующая нахождение границ объектов на больших аэрофотоснимках.
4. Проведен анализ эффективности параллельного выполнения алгоритма определения границ. Показано существенное уменьшение времени выполнения программы.

Работа выполнена в рамках госзадания «НАУКА», регистрационный номер НИР: 4.318.2012

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сонькин М.А., Ямпольский В.З. Интегрированные системы мониторинга для труднодоступных и подвижных объектов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010 г. – 123 с.
2. Сонькин М.А., Ямпольский В.З. Навигационно-телекоммуникационные системы мониторинга подвижных объектов, мобильных групп и центров управления // Проблемы информатики. – 2011. – Вып. 2 (10). – С. 4–10.
3. Оператор Собеля // Википедия. 2013–2013. Дата обновления: 13.03.2013. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=53441014> (дата обращения: 13.03.2013).
4. Ватутин Э.И., Мирошниченко С.Ю., Титов В.С. Программная оптимизация оператора Собеля с использованием SIMD-расширений процессоров семейства x86 // Телекоммуникации. – 2006. – Вып. 6. – С. 12–16.
5. Демин А.Ю., Рейзлин В.И. Анализ программного обеспечения на основе структурно-графического представления // Проблемы информатики. – 2011. – Специальный выпуск. – С. 6–15.

Поступила 29.04.2013 г.

UDC 004.032.24

## PARALLELIZATION OF ALGORITHM FOR DETECTING BORDERS ON THE BASIS OF STRUCTURAL AND GRAPHIC PRESENTATION

A.Yu. Demin, V.A. Dorofeev

Tomsk Polytechnic University

*The urgency of the discussed issue is caused by the need to investigate the possibility of parallel algorithms based on the structural and graphic presentation.*

*The main aim of the study is to parallelize the algorithm for finding the boundaries on aerial photographs using structural and graphic form.*

*The methods used in the study are the raster image processing in intelligent navigation and control using linear filters; presenting of algorithms in graph form: the operator tree, flowcharts, data flow graph; designing software by means of the platform .Net and Task Parallel Library.*

*The results: The paper describes the software implementation of the algorithm for finding the boundaries of objects in images using Sobel operator. Software implementation is presented in the structural and graphic form. The authors propose a semi-automatic approach to parallelization of the considered software load. A software algorithm is parallelized and the effectiveness of parallelization for different images is analysis.*

### Key words:

*Sobel operator, image processing, tree of operators, data flow graph, parallel programming model.*

## REFERENCES

1. Sonkin M.A., Yampolskiy V.Z. *Integrirovannye sistemy monitoring dlya trudno dostupnykh i podvizhnykh obektov* [Integrated monitoring system for remote and mobile objects]. Tomsk, NTL Publ., 2010. 123 p.
2. Sonkin M.A., Yampolskiy V.Z. Navigatsionno-telekommunikatsionnye sistemy monitoringa podvizhnykh obektov, mobilnykh grupp i tsentrov upravleniya [Navigation and communication systems for moving objects monitoring, mobile units and control centers]. *Problemy informatiki*, 2011, no. 2 (10), pp. 4–10.
3. *Operator Sobelya. Wikipedia*. 2013–2013. Retrieved: 13.03.2013. Available at: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=53441014> (accessed 13 March 2013).
4. Vatutin E.I., Miroshnichenko S.Yu., Titov V.S. Programmnyaya optimizatsiya operatora Sobela s ispolzovaniem SIMD-rasshireniy protsessorov semeystva x86 [Software optimization of Sobel operator using SIMD-extensions of the x86 family processors]. *Telekommunikatsii*, 2006, no. 6, pp. 12–16.
5. Demin A.Yu., Reyklin V.I. Analiz programmnoho obespecheniya na osnove strukturno-graficheskogo predstavleniya [Analysis of software based on structural graphical representation]. *Problemy informatiki*, 2011, Special Issue, pp. 6–15.

## РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Т.Е. Лощухина, В.А. Дорофеев

Томский политехнический университет

E-mail: Loshuhina.Tatiana@yandex.ru

**Актуальность работы** обусловлена широким распространением графических процессоров и возможностью их использования для повышения производительности с помощью организации параллельных вычислений.

**Цель работы:** выявить положительные и отрицательные стороны применения параллельных гетерогенных вычислительных систем при решении нетрадиционных, а именно неграфических задач, задействованных в информационных системах прикладного уровня, провести сравнительный анализ нескольких технологий гибридных параллельных вычислений и рассмотреть практический пример применения гетерогенных вычислений.

**Методы исследования:** реализация алгоритма поиска оптимального маршрута на выбранных вычислительных устройствах, оценка производительности каждой реализации.

**Результаты:** изучена зависимость производительности алгоритма поиска оптимального маршрута от количества узлов исходного графа и количества вычислительных устройств. Разработан алгоритм обновления рабочей группы при размерности исходного буфера некротной размерности этой группы.

### Ключевые слова:

Параллельный алгоритм, гибридные технологии, гетерогенные вычислительные системы, графовая модель, методы синхронизации.

### Введение

Идея использования гибридных вычислительных систем появились сравнительно недавно, около десяти лет назад, однако к настоящему моменту этот подход получил существенное распространение и выделился в отдельное направление в сфере информационных технологий. Под гибридными системами подразумевается любая система, в аппаратную конструкцию которой входит два и более блока вычислительных модулей. Самой распространённой конструкцией гибридных систем на сегодня принято считать аппаратную связку из процессоров общего назначения и графических процессоров (или карт-ускорителей для вычислений). В основном такие системы применяются для организации параллельных вычислений. При этом параллельные вычисления на графических процессорах уже являются не только средством повышения производительности решения задач, нацеленных на наложение фильтрации графических текстур и повышения детализации графических элементов, но и нацелены на массово-параллельную обработку любых данных, над которыми должны быть проведены алгебраические операции любой сложности.

### Параллельный алгоритм Флойда для гетерогенной системы

Для разработки функционала под гибридные системы в настоящий момент наиболее актуальными являются следующие технологии: CUDA (поддерживается только для видеокарт и карт-ускорителей от NVIDIA), OpenCL, ATI APP (работает только на видеокартах и ускорителях от AMD), C++ AMP. Так как изначально мы нацеливались на кроссплатформенность в исследовании производительности и удобства реализации алгоритма на конкретной платформе, то и технологиями, кото-

рые больше всего подходили под указанные требования, были OpenCL и C++ AMP. Чтобы произвести оценку эффективности применения указанных технологий при решении определённого класса задач (а именно подготовка, обновление и доступ к данным), было решено разработать ряд динамически подключаемых библиотек (DLL), ответственных за применение функциональных возможностей рассматриваемой платформы. Таким образом, вся работа была сведена к нескольким этапам:

- 1) конструирование интерфейса для управления и контроля доступных платформ и сопряжённых с ними устройств;
- 2) разработка DLL-библиотеки, решающей выбранную задачу с использованием заданной платформы;
- 3) оценка времени, затраченного на исполнение процедур;
- 4) сравнение производительностей параллельной гетерогенной системы с производительностью при использовании стандартной многопоточности и последовательным вариантом выполнения тех же задач.

В качестве примера в данной статье рассматривается решение задачи выбора оптимального маршрута на карте. Начальный этап – инициализация данных – определяет выбор алгоритма. На этом этапе формируется граф, состоящий из узлов и представляющий собой пересечения улиц на карте, и рёбер, отражающих расстояния между вершинами. Очевидно, что алгоритм для поиска маршрута должен быть годным для распараллеливания, и это позволило существенно сократить список алгоритмов поиска оптимального маршрута в графе.

В качестве алгоритма поиска маршрута был выбран алгоритм Флойда. Суть метода состоит в

следующем: в распоряжении алгоритма имеются две матрицы (матрица значений длины маршрута между указанными узлами  $D_{n \times n}$  и матрица смежности  $S_{n \times n}$ , указывающая промежуточные пункты на пересечении стартовой и финальной позиции), размера  $n \times n$ , где  $n$  – число вершин в графе [1].

Для того чтобы подготовить данные к использованию алгоритмом, они инициализируются следующим образом:

1. Если из пункта «А» существует путь в пункт «Б», то  $\{d_{ij}=l; s_{ij}=j\}$ , где  $s_{ij}$  – элемент матрицы  $S_{n \times n}$ ,  $d_{ij}$  – элемент матрицы  $D_{n \times n}$ ,  $i$  – порядковый номер пункта «А» и номер строки матрицы,  $j$  – порядковый номер пункта «Б» и номер столбца матрицы,  $l$  – длина маршрута от «А» до «Б».
2. Если между пунктами «А» и «Б» нет связи, то  $\{d_{ij}=-1; s_{ij}=-1\}$ , равно как и в случае при  $\{i=j\}$ .

Как сказано выше, алгоритм выполняется столько раз, сколько есть вершин в графе, при этом номер итерации учитывается при обновлении данных. Так, на  $k$ -той итерации производятся следующие действия над каждым элементом матрицы (одновременно): если  $\{d_{ik}, d_{kj}\}$  положительны и  $\{i < j, j < k, i < k\}$ , то в случае  $d_{ij} > (d_{ik} + d_{kj})$ , как и  $d_{ij} = -1$ , производится замена  $\{d_{ij} = d_{ik} + d_{kj}; s_{ij} = k\}$ , в противном случае замена не производится.

Результатом алгоритма будут две матрицы: первая будет указывать, существует ли путь между двумя конкретными вершинами (вне зависимости от того, смежные они или нет); вторая позволит выстроить путь от узла «А» к узлу «Б» путём восстановления порядка следования вершин. Распишем механизм восстановления пути подробно. Изначально имеется только подмножество из двух вершин  $\{i, j\}$ . Если  $s_{ij} < j$ , то подмножество дополняется третьей промежуточной вершиной между предварительно рассматриваемыми, а итоговое подмножество примет вид  $\{i, s_{ij}, j\}$ . После каждого случая повторного добавления промежуточного узла путь восстановления маршрута производится заново до тех пор, пока равенство  $s_{ij} = j$  не будет истинным для каждой смежной пары [2].

#### Особенности разработки функционала под гетерогенные системы

Под функцией ядра (или кёрнел-функцией) понимается функция, которая выполняется в изолированном потоке на отдельном вычислительном модуле исполняемого устройства для обработки элемента (или «рабочего элемента») исходного массива данных, а под «рабочей группой» – двумерный массив из рабочих элементов. Любая система параллельного гетерогенного типа располагает ограниченным количеством параллельно запускаемых копий кёрнел-функций. Это объясняется тем, что аппаратные ресурсы вычислительной системы ограничены. Как правило, используемая платформа гетерогенной системы содержит вспомогательный инструментарий для определения допустимой размерности рабочего блока данных [3], как, например, OpenCL. Одна-

ко одна и та же технология, в зависимости от платформы, может иметь разный набор программных интерфейсов, что ограничивает нас при решении задачи общим для всех платформ набором интерфейсов.

Вопрос о допустимой размерности рабочей группы можно легко обойти, установив её размерность равной числу, кратному 16 [4, 5]. То есть рабочая группа  $16 \times 16$  самый выигрышный вариант при работе с параллельными технологиями для гибридных вычислительных систем. Более того, число реальных данных, подлежащих обновлению, может значительно превышать размер допустимого числа одновременно запускаемых потоков и быть не кратным размерности рекомендуемой рабочей группы. Что касается последнего аспекта, то он довольно просто обходится, если исполняемому устройству известна исходная размерность буфера рабочих данных. Рассмотрим данный этап подробнее (рис. 1).

Введём пояснение принятых обозначений:  $M$  – размерность матрицы буфера данных;  $L$  – размерность допустимых областей рабочей группы;  $N = (M/L)$  – число полных рабочих групп на исходный буфер;  $\Delta = (M \% L)$  – размерность остатка буфера данных;  $t = (L - \Delta)$  – размерность избыточного обновления буфера;  $A = (M - L)$  – позиция  $(N+1)$ -й рабочей группы.

На рис. 1 изображена ситуация, когда размерность буфера данных не кратна значению допустимой рабочей группы и приведены два способа обхода данной проблемы. В первом случае (рис. 1, а) обновление производится с учётом позиции расположения  $(N+1)$ -го блока рабочей группы. При таком способе организации данных не изменяется время исполнения, так как обновление функциональных элементов производится единовременно; более того, при условии, что расположение данных удовлетворяет условию  $j > (A+t)$ , нетронутые данные будут обновлены, а те, которые обновлялись прежде, останутся нетронутыми, так как возможное преобразование над ними уже выполнено. Ситуация, показанная на рис. 1, б, никаких дополнительных расчётов не требует, при этом значение размерности матрицы буфера данных обязательно должно быть передано устройству исполнения. Значение аргумента  $M$  для кёрнел-функции имеет два значения: *во-первых*, позволяет поместить обновлённый элемент на ту же исходную позицию буфера данных; *во-вторых*, позволит контролировать выход за границы памяти исходного диапазона буфера данных, что вызовет сбой работы эксплуатируемого приложения. При этом второе утверждение действительно только для метода обновления, изображённого на рис. 1, б, тогда как первое заявление справедливо для обеих ситуаций. Если в качестве аргумента  $M$  будет рассматриваться параметр  $L$  (то есть значение размерности блока рабочей группы), то обрабатываемые блоки будут расположены последовательно в исходном буфере, что нарушит их изначальное блочное расположение.

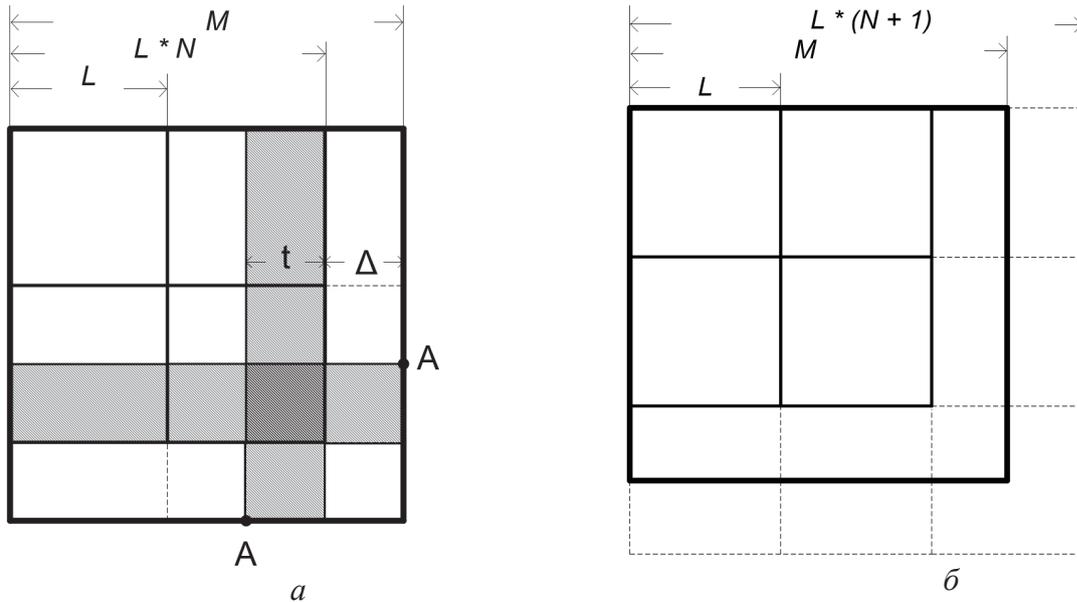
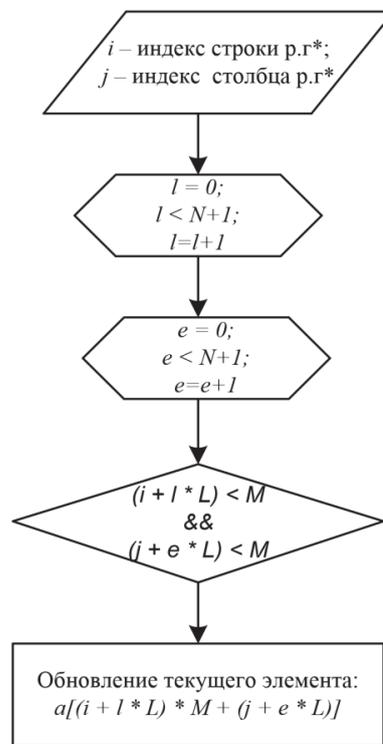


Рис. 1. Варианты обновления буфера данных

Вернёмся к программной реализации, а именно к способу построения такой организации памяти в рамках параллельных вычислительных технологий. Некоторые технологии параллельных гетерогенных вычислительных систем дают возможность запускать на параллельное исполнение не только элементы в пределах одной рабочей группы, но и блоки из рабочих групп. Однако такими возможностями обладает не каждая технология, что можно легко обойти с помощью вложенных циклов внутри функции-ядра. Такой подход не приветствуется, так как противоречит идее параллельности исполнения. Кроме того, время программного исполнения в этом случае возрастает по экспоненциальному закону, что сильно снижает производительность. В то же время с помощью вложенных циклов можно обновить все элементы, расположенные на одной позиции в каждой из рабочих групп. Блок-схема для такого механизма приведена на рис. 2.

После того как подходящий алгоритм выбран и решён вопрос со способом инициализации исходных данных, встает вопрос о способах оценки эффективности применения гибридных вычислений на прикладных задачах. Эксплуатируемая система представляет собой источник информации о местности в виде карты с нанесёнными на неё объектами, которые в совокупности образуют ориентированный взвешенный граф. Чтобы подготовить данные к исполнению алгоритма, формируется матрица  $V_{n \times n}$  из векторов  $v_{ij}$ . Каждый вектор  $v_{ij}$  свидетельствует о наличии либо отсутствии пути между вершинами  $i$  и  $j$ . Если путь есть, то  $v_{ij} = \{x_i, y_i, x_j, y_j\}$ . После пересылки этой информации исполнительному устройству в распоряжении программы окажется буфер данных с начальными значениями для запуска алгоритма поиска оптимального маршрута между указанными вершинами, а также время, за

которое была произведена операция. При регулярном наращивании количества объектов и измерениях времени выполнения задачи были построены графики зависимости времени выполнения от количества объектов с учётом следующих факторов: используемая технология вычислений для гибридных систем и исполнительное устройство.



\* р.г. – (сокр.) рабочая группа

Рис. 2. Обновление всего буфера исходных данных в пределах одного блока рабочей группы

Экспериментальные исследования проводились на компьютере с процессором Intel Core i5-4570T с частотой 2,9 ГГц и 16 Гб оперативной памяти. В качестве тестируемого графического устройства был выбран интегрированный в данный процессор Intel HD Graphics 4600, поддерживающий OpenCL. Для сравнения приведены графики времени решения той же задачи в многопоточном режиме, реализуемом стандартными средствами платформы .NET и в однопоточном режиме (рис. 3–7).

Из приведённых диаграмм видна экспоненциальная зависимость времени исполнения от количества объектов при эксплуатации системы на аппаратуре с поддержкой гибридных вычислений. При тестировании той же системы с использованием стандартных многопоточных способов распараллеливания видно, что временная зависимость стремится к константному значению, что является наиболее предпочтительным результатом, однако время выполнения в данном режиме

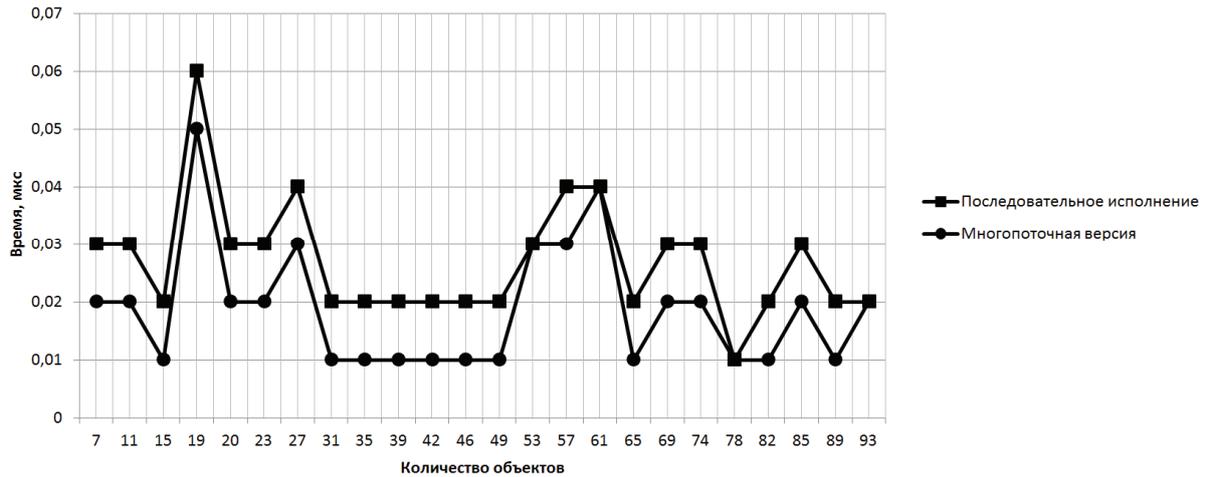


Рис. 3. Зависимость времени выполнения от количества объектов в однопоточной и многопоточной версиях инициализации

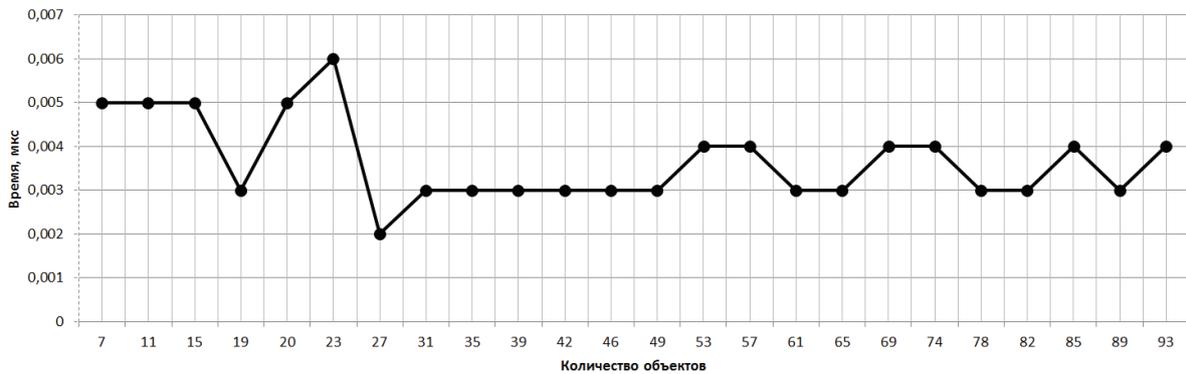


Рис. 4. Зависимость времени выполнения от количества объектов при инициализации при использовании технологии C++AMP



Рис. 5. Временная зависимость от числа объектов при инициализации с использованием OpenCL-стандарта для разных устройств исполнения

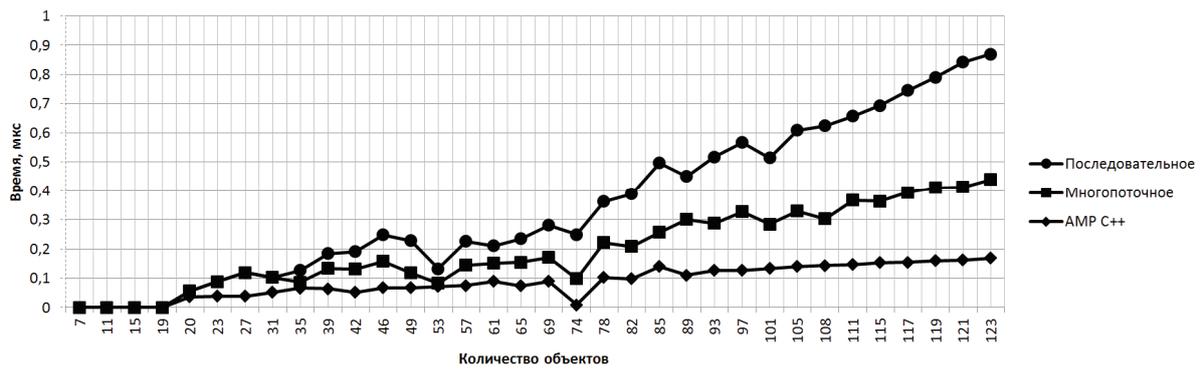


Рис. 6. Временная зависимость от числа объектов при выполнении алгоритма в многопоточном, однопоточном режимах и с использованием параллельной технологии для гетерогенной системы

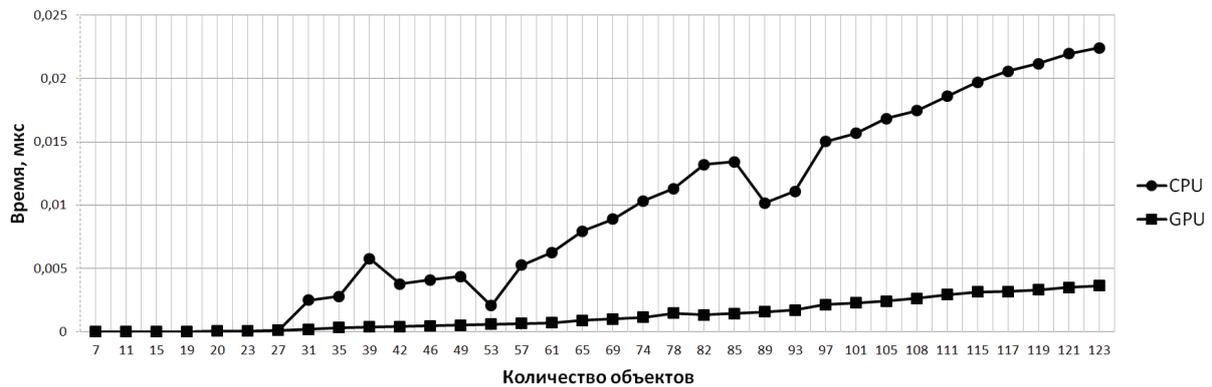


Рис. 7. Временная зависимость от числа объектов при выполнении алгоритма поиска оптимального маршрута с использованием OpenCL-стандарта на разных вычислительных устройствах

значительно выше, чем при запуске того же инструментария на гетерогенной вычислительной системе.

### Выводы

В ходе выполнения работы была изучена зависимость производительности алгоритма поиска оптимального маршрута от количества узлов исходного графа и количества вычислительных устройств. Эксперименты показали, что наиболее предсказуемые результаты получаются на платформе OpenCL: прирост ускорения почти постоян-

ный, что в определённых пределах можно использовать для экстраполяции значений при масштабировании приложения.

Другим результатом работы стал алгоритм обновления рабочей группы в тех случаях, когда размерность исходного буфера данных не кратна размерности этой группы, или же размерность буфера неизвестна в момент проектирования приложения. Предложенный способ обеспечивает корректное заполнение рабочей группы и последующее извлечение обработанных данных без повреждения структуры исходных данных.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модели и структуры данных / В.Д. Далека, А.С. Деревянко, О.Г. Кравец, Л.Е. Тимановская. – Харьков: ХГПУ, 2000. – 241 с.
2. Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 423 с.
3. Scarpino M. OpenCL in action. – S.I.: Manning, 2012. – 458 p.

4. Мот Д. Введение в C++AMP на основе кода // Журнал MSDN magazine. 2012. URL: <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/hh882446.aspx> (дата обращения: 15.04.2013).
5. Мот Д. Введение в мозаичное заполнение C++ AMP // Журнал MSDN magazine. 2012. <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/hh882447.aspx> (дата обращения: 15.04.2013).

Поступила 26.05.2013 г.

UDC 004.032.24

## SOLVING THE APPLIED TASKS USING THE HETEROGENEOUS COMPUTING SYSTEMS

T.E. Loshchukhina, V.A. Dorofeev

Tomsk Polytechnic University

**The urgency** of the discussed issue is caused by the wide spreading of graphics processors and the ability to use them to improve the performance by parallel computing.

**The main aim of the study** is to identify the positive and negative aspects of using the heterogeneous parallel computing systems for solving non-traditional, i.e. non-graphics tasks involved in application level of information systems; to analyze several hybrid parallel computing technologies and to review the practical example of heterogeneous computing usage.

**The methods used in the study:** algorithm for finding the optimal route implementation on the selected computing devices, evaluation of the performance of each implementation.

**The results:** The authors have studied the dependence of the performance of the algorithm for finding optimal route on a number of the original graph nodes and the number of computing devices; they developed the algorithm for updating the working group at the source buffer dimension that is not multiple to the group dimension.

### Key words:

Parallel algorithm, hybrid technology, heterogeneous computing, graph model, synchronizing methods.

### REFERENCES

1. Daleka V.D., Derevyanko A.S., Kravec O.G., Timanovskaya L.E. *Modeli i struktury dannykh* [Models and data structures]. Har'kov, HGPU, 2000. 241 p.
2. Gergel V.P. *Teoriya i praktika paralelnykh vychisleniy* [Parallel computing theory and practice]. Moscow, Internet-Universitet Informacionnyh Tehnologiy; BINOM. Laboratoriya znaniy, 2007. 423 p.
3. Scarpino M. *OpenCL in action*. S.I., Manning, 2012. 458 p.
4. Mot D. Vvedenie v C++AMP na osnove koda. *Zhurnal MSDN magazine*, 2012. Available at: <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/hh882446.aspx> (accessed 15 April 2013).
5. Mot D. Vvedenie v mozaichnoe zapolnenie C++ AMP. *Zhurnal MSDN magazine*, 2012. Available at: <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/hh882447.aspx> (accessed 15 April 2013).

УДК 004.822; 004.4'2

## АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ОНТОЛОГИЯХ НА ЯЗЫКЕ OWL 2

И.А. Заикин

Томский политехнический университет

E-mail: zaikin@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью коллективной распределённой разработки веб-онтологий, одной из задач которой является сравнение версий онтологий и анализ изменений. Для повышения эффективности совместной работы необходимо предоставить разработчикам обработанную информацию об изменениях в онтологии (какие сущности были изменены, добавлены или удалены в новой версии онтологии), а также о том, какие именно изменения были произведены над каждой сущностью. В работе предложен метод анализа структурных изменений, полученных с использованием прямой семантики языка OWL 2, позволяющий выявлять изменённые, добавленные и удалённые из онтологии сущности, а также сопоставлять каждой затронутой сущности множество изменений. Приведены основные алгоритмы, решающие данную задачу, описание их программной реализации, а также результаты тестирования производительности алгоритмов.

### Ключевые слова:

Онтология, OWL 2, аксиома, сущность, изменение.

### Введение

Онтологией в информатике называют формальное описание некоторой предметной области или задачи на языке, понятном как людям, так и вычислительным машинам. Одним из самых распространённых языков описания онтологий в настоящее время является язык веб-онтологий OWL 2 [1], стандартизированный консорциумом всемирной паутины (W3C), с использованием которого

ежегодно создаётся множество онтологий, сложность которых также возрастает. Разработка сложных онтологий требует участия не одного, а нескольких специалистов: специалистов по языку онтологий, специалистов в предметной области, специалистов по управлению качеством. Совместная разработка сложных онтологий невозможна без инструментальных средств поддержки коллективной работы. В разработке программного обеспече-

ния одним из таких средств являются системы управления версиями, которые дают возможность вести журнал изменений, отменять нежелательные изменения, сравнивать версии, объединять изменения разных членов команды и облегчают разрешение конфликтов. Одним из важнейших компонентов таких систем является программа для сравнения онтологий, результатом работы которой является набор изменений между двумя версиями. Обычные программы для сравнения текстов опираются на предположение, что порядок строк в тексте имеет значение. В то же время язык OWL 2 не накладывает ограничений на порядок следования аксиом. К тому же одна и та же онтология может быть сохранена в различных форматах. Эти факторы не позволяют использовать для сравнения онтологий существующие программы сравнения текстов.

Язык OWL 2 имеет две семантики: (1) исторически сложившуюся, основанную на RDF [2], где основными понятиями являются ресурсы и отношения между ними, а сложные конструкции представлены с использованием так называемых «пустых узлов», и (2) прямую семантику [3], где основными понятиями являются сущность и аксиома, а для представления сложных конструкций существуют специальные типы аксиом. Сравнение RDF-графов (использование семантики 1) – вычислительно сложный процесс [4], а при наличии большого количества пустых узлов однозначно идентифицировать изменённые триплеты невозможно [5]. В данной работе используется метод структурного сравнения онтологий на основе прямой семантики языка OWL 2. Понятие «структурное сравнение» основано на понятии «структурная эквивалентность», определённом в спецификации OWL 2 [1]. Использование прямой семантики языка OWL 2 даёт возможность не задумываться о пустых узлах, а выполнять сравнение поаксиомно, используя операции над множествами. Однако простые списки добавленных и удалённых аксиом не дают общей картины изменений. Для повышения эффективности совместной работы также необходимо предоставить разработчикам информацию о том, какие сущности были изменены, добавлены или удалены в новой версии онтологии, а также о том, какие именно изменения были произведены над каждой сущностью.

#### Постановка задачи

Под онтологией в данной работе понимается совокупность  $\langle E, A, I, P, d, f \rangle$ , где  $E$  – конечное неупорядоченное множество сущностей OWL 2 (классов, типов данных, индивидов и свойств), каждая из которых имеет интернационализованный идентификатор (IRI);  $A$  – конечное неупорядоченное множество аксиом (некоторых логических утверждений о сущностях);  $I$  – конечное неупорядоченное множество ссылок на другие онтологии (импортов);  $P$  – конечное неупорядоченное множество пар вида  $(p_n, p_i)$ , где  $p_n$  – имя префикса – короткая

строка, используемая для сокращения имён сущностей, а  $p_i$  – часть IRI, вместо которой может использоваться  $p_n$ ;  $d$  – идентификатор онтологии, состоящий из IRI самой онтологии и IRI её версии;  $f$  – формат онтологии, который может принимать одно из следующих значений: «RDF/XML», «Turtle», «OWL/XML», «OWL Functional Syntax», «OWL Manchester Syntax».

Онтология может содержать только те сущности, на которые ссылается хотя бы одна аксиома. Таким образом, удаление сущности из онтологии подразумевает удаление всех аксиом, ссылающихся на удаляемую сущность, добавление сущности – добавление хотя бы одной аксиомы, ссылающейся на добавляемую сущность, а изменение сущности – добавление не первой аксиомы или удаление не последней аксиомы, ссылающейся на эту сущность.

Пусть исходная версия онтологии  $v_1$  содержит множество сущностей  $E_1$ , а изменённая версия  $v_2$  – множество сущностей  $E_2$ . Задача анализа изменений состоит в решении следующих подзадач:

1. Поиск множества  $E' \subseteq E_1 \cup E_2$  сущностей, затронутых изменениями (добавленных, удалённых, изменённых).
2. Разбиение множества  $E'$  на три подмножества:  $E^+$  – множество новых сущностей;  $E^-$  – множество удалённых сущностей;  $E^*$  – множество изменённых сущностей (присутствующих в обеих версиях);
3. Сопоставление каждой изменённой, добавленной и удалённой сущности множества изменений.

#### Описание метода

Пусть  $A^U$  – множество всех возможных аксиом, допустимых с точки зрения синтаксиса языка OWL 2;  $C^{U+}$  – множество всех возможных добавлений аксиом, определяемое функцией  $\text{AddAxiom}: A^U \rightarrow C^{U+}$ , т. е.  $C^{U+} = \{\text{AddAxiom}(a) | a \in A^U\}$ ;  $C^{U-}$  – множество всех возможных удалений аксиом, определяемое функцией  $\text{RemoveAxiom}: A^U \rightarrow C^{U-}$ , т. е.  $C^{U-} = \{\text{RemoveAxiom}(a) | a \in A^U\}$ ;  $C^U = C^{U+} \cup C^{U-}$  – множество всех возможных изменений. Определим функцию  $\delta: \mathcal{P}(A^U) \times \mathcal{P}(A^U) \rightarrow \mathcal{P}(C^U)$ , выполняющую поиск изменений между двумя множествами аксиом  $A_1 \subseteq A^U$  и  $A_2 \subseteq A^U$  следующим образом:

$$C = \delta(A_1, A_2) = \{\text{RemoveAxiom}(a) | a \in A_1 \setminus A_2\} \cup \{\text{AddAxiom}(a) | a \in A_2 \setminus A_1\},$$

т. е. каждая аксиома, входящая в  $A_1$ , но не входящая в  $A_2$ , считается удалённой, а каждая аксиома, входящая в  $A_2$ , но не входящая в  $A_1$ , считается добавленной.

Определим сигнатуру  $\sigma(a)$  аксиомы  $a$  как конечное неупорядоченное множество сущностей, на которые ссылается аксиома  $a$ . Сигнатура множества аксиом рассчитывается как объединение сигнатур отдельных аксиом:

$$\sigma(\{a_1, a_2, \dots, a_n\}) = \sigma(a_1) \cup \sigma(a_2) \cup \dots \cup \sigma(a_n).$$

Сигнатура изменения равна сигнатуре соответствующей аксиомы:

$\sigma(\text{AddAxiom}(a)) = \sigma(a)$ ,  $\sigma(\text{RemoveAxiom}(a)) = \sigma(a)$ .

Сигнатура множества изменений рассчитывается как объединение сигнатур отдельных изменений:

$$\sigma\{c_1, c_2, \dots, c_n\} = \sigma(c_1) \cup \sigma(c_2) \cup \dots \cup \sigma(c_n).$$

Множество сущностей, затронутых изменениями  $C$ , можно найти как сигнатуру изменений  $C$ :  $E' = \sigma(c)$ . На рис. 1 множество  $E'$  обозначено пунктирным прямоугольником. Исходя из рисунка, можно найти множество удалённых сущностей  $E^- = E' \setminus E_2 = E_1 \setminus E_2$ , множество добавленных сущностей  $E^+ = E' \setminus E_1 = E_2 \setminus E_1$  и множество изменённых сущностей  $E^* = E' \cap E_1 \cap E_2$ . На рис. 1 также обозначены неизменённые сущности  $E^{\parallel} = (E_1 \cap E_2 \setminus E')$ .

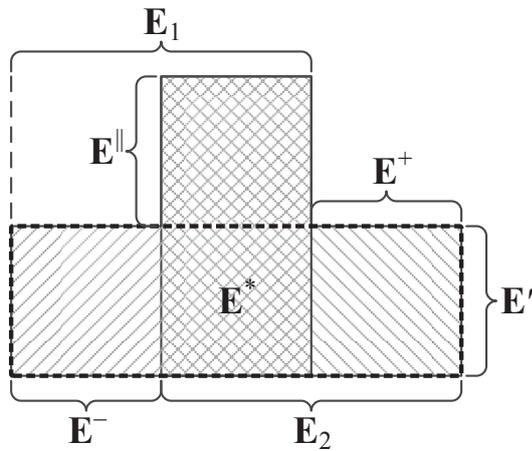


Рис. 1. Соотношение между множествами  $E_1$  (штриховка вправо),  $E_2$  (штриховка влево),  $E^+$ ,  $E^-$ ,  $E^*$ ,  $E$  и  $E'$

Для каждой сущности  $e$  можно найти множество связанных с ней изменений

$$\sigma^{-1}(e) = \{c \in C \mid e \in \sigma(c)\}.$$

#### Алгоритм извлечения сущностей, затронутых изменениями

Входные данные:

- множество изменений  $C$ .

Выходные данные:

- множество затронутых изменениями сущностей  $E' = \sigma(c)$ .

1.  $E' \leftarrow \{\}$
2. Для каждого изменения  $c \in C$
3. Для каждой сущности  $e \in \sigma(c)$
4.  $E' \leftarrow E' \cup \{e\}$

#### Алгоритм классификации сущностей

Входные данные:

- сигнатура  $E_1$  исходной версии онтологии;
- сигнатура  $E_2$  изменённой версии онтологии;
- множество затронутых изменениями сущностей  $E'$ .

Выходные данные:

- множество изменённых сущностей  $E^*$ ;
  - множество новых сущностей  $E^+$ ;
  - множество удалённых сущностей  $E^-$ .
1.  $E^+ \leftarrow \{\}$

2.  $E^- \leftarrow \{\}$
3.  $E^* \leftarrow \{\}$
4. Для каждой сущности  $e \in E'$
5. Если  $e \in E_1$
6. Если  $e \in E_2$
7.  $E^* \leftarrow E^* \cup \{e\}$
8. иначе
9.  $E^- \leftarrow E^- \cup \{e\}$
10. иначе
11.  $E^+ \leftarrow E^+ \cup \{e\}$

#### Алгоритм классификации изменений

Входные данные:

- Бинарное отношение  $R_{CE} = \{(c, \sigma(c)) \mid c \in C\} \subset C \times \mathcal{P}(E')$ , ставящее в соответствие каждому изменению его сигнатуру.

Выходные данные:

- Бинарное отношение  $R_{EC} \subset E' \times \mathcal{P}(C)$ , ставящее в соответствие каждой сущности множество затрагивающих её изменений.

1.  $R_{CE} \leftarrow \{\}$
2. Для каждой пары  $(c, E_c) \in R_{CE}$
3. Для каждой сущности  $e \in E_c$
4. Если  $\exists (e, C_e) \in R_{EC}$
5.  $C_e \leftarrow C_e \cup \{c\}$
6. иначе
7.  $R_{EC} \leftarrow R_{EC} \cup \{(e, \{c\})\}$

#### Программная реализация

Предложенные алгоритмы были реализованы на объектно-ориентированном языке программирования Java с использованием библиотеки OWL API [6]. На рис. 2 приведена диаграмма классов программы. Из рисунка видно, что онтология может содержать множество аксиом, а каждая аксиома – множество сущностей, причём одна и та же сущность может встречаться в нескольких аксиомах. Онтология, аксиома и сущность являются подклассами класса OWLObject. Метод getSignature() класса OWLObject реализует функцию  $\sigma$ . Набор изменений ChangeSet состоит из множества изменений OWLAxiomChange, каждое из которых может быть либо добавлением (AddAxiom), либо удалением (RemoveAxiom) аксиомы. Конструктор класса ChangeSet принимает два экземпляра OWLOntology и выполняет их поаксиомное сравнение (реализует функцию  $\delta$ ). Результат сравнения можно получить, вызвав метод getAxiomChanges(). Класс EntityExtractor реализует алгоритм извлечения сущностей, затронутых изменениями. Метод getEntities() предоставляет доступ к множеству извлечённых сущностей. Класс EntityClassifier реализует алгоритм классификации сущностей и содержит методы getNewEntities(), getRemovedEntities() и getModifiedEntities() для доступа к новым, удалённым и изменённым сущностям соответственно, а также метод getAllEntities() для удобного доступа ко всем затронутым изменениями сущностям. Класс ChangeClassifier реализует алгоритм классификации изменений и предоставляет метод getChangesByEntity() для получения



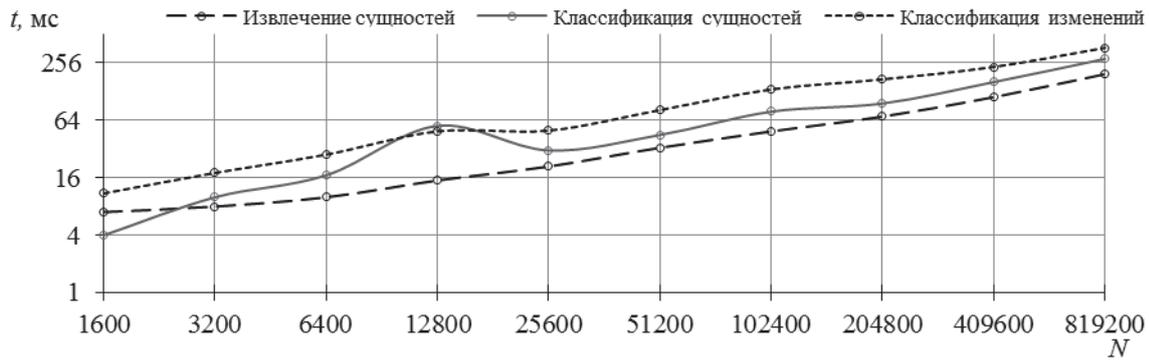


Рис. 3. График зависимости времени работы алгоритмов от размера онтологий

других форматов. Для таких онтологий не требуется анализ при каждом изменении, однако приведённые алгоритмы могут быть применены и к ним.

### Заключение

Предложенный метод анализа изменений позволяет выделять сущности, фигурирующие в изменениях, классифицировать их на новые, удалённые и изменённые, а также находить изменения, соответствующие этим сущностям. Результаты решений по предложенному методу в дальнейшем предполагается использовать при построении системы управления проектами, предназначенной для разработ-

ки онтологий. Данный метод даст возможность отслеживать, когда та или иная сущность была введена, удалена или изменена, что позволит автоматизировать описание изменений разработчиками онтологий, а также позволит им быстро находить требуемые изменения в журнале изменений.

Разработанное программное обеспечение использовалось при построении онтологии предметной области «Интеллектуальное месторождение».

*Разработка проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках финансирования работ по Государственному контракту 14.515.11.0047.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Motik B., Patel P.F., Parsia B. OWL 2 Web Ontology Language structural specification and functional style syntax // World Wide Web Consortium. 2009. URL: <http://www.w3.org/TR/owl2-syntax/> (дата обращения: 31.05.2013).
2. Schneider M. OWL 2 Web Ontology Language RDF-Based Semantics // World Wide Web Consortium. 2009. URL: <http://www.w3.org/TR/owl2-rdf-based-semantics/> (дата обращения: 11.11.2012).
3. Motik B., Patel-Schneider P.F., Cuenca Grau B. OWL 2 Web Ontology Language Direct Semantics // World Wide Web Consortium. 2009. URL: <http://www.w3.org/TR/owl2-direct-semantics/> (дата обращения: 11.11.2012).
4. Carroll J. Matching RDF Graphs. 26.11.2001. URL: <http://www.hpl.hp.com/techreports/2001/HPL-2001-293.pdf> (дата обращения: 23.10.2012).
5. DeltaView // ESW Wiki. 12.11.2007. URL: <http://esw.w3.org/DeltaView> (дата обращения: 31.05.2013).
6. Horridge M., Bechhofer S. The OWL API: A Java API for Working with OWL 2 Ontologies // CEUR Workshop Proceedings (OWLED 2009: 6th OWL Experiences and Directions Workshop, Chantilly, Virginia, October 2009). – 2009. – V. 529. – P. 53–62.

Поступила 05.06.2013 г.

## ANALYSIS OF STRUCTURAL CHANGES IN OWL 2 ONTOLOGIES

I.A. Zaikin

Tomsk Polytechnic University

The urgency of the discussed problem is caused by the need to develop web ontologies in a distributed collaborative manner. One of the tasks is the ontology version comparison and change analysis. The developers require processed information on ontology changes in order to collaborate more efficiently (what entities were changes, added or removed from the ontology), as well as the information on changes performed on each specific entity. This paper proposes a way of analyzing structural changes obtained when using OWL 2 direct semantics, which allows us to reveal entities that were modified, added or removed from the ontology, as well as to find changes related to each modified entity. The author shows the main algorithms, which solve this task, software implementation of the algorithms, and performance testing results.

**Key words:**

Ontology, OWL 2, axiom, entity, change.

**REFERENCES**

1. Motik B., Patel P.F., Parsia B. *OWL 2 Web Ontology Language structural specification and functional style syntax*. World Wide Web Consortium. 2009. Available at: <http://www.w3.org/TR/owl2-syntax/> (accessed 31 May 2013).
2. Schneider M. *OWL 2 Web Ontology Language RDF-Based Semantics*. World Wide Web Consortium. 2009. Available at: <http://www.w3.org/TR/owl2-rdf-based-semantics/> (accessed 11 November 2012).
3. Motik B., Patel-Schneider P.F., Cuenca Grau B. *OWL 2 Web Ontology Language Direct Semantics*. World Wide Web Consortium. 2009. Available at: <http://www.w3.org/TR/owl2-direct-semantics/> (accessed 11 November 2012).
4. Carroll J. *Matching RDF Graphs*. 26.11.2001. Available at: <http://www.hpl.hp.com/techreports/2001/HPL-2001-293.pdf> (accessed 23 October 2012).
5. *DeltaView*. ESW Wiki. 12.11.2007. Available at: <http://esw.w3.org/DeltaView> (accessed 31 May 2013).
6. Horridge M., Bechhofer S. The OWL API: A Java API for Working with OWL 2 Ontologies. *CEUR Workshop Proceedings (OWLED 2009: 6<sup>th</sup> OWL Experiences and Directions Workshop*. Chantilly, Virginia, October 2009, vol. 529, pp. 53–62.

# Системная инженерия

УДК 372.862

## СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ЕЁ ВНЕДРЕНИЕ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

П.С. Чубик, Н.Г. Марков, Е.А. Мирошниченко, Т.С. Петровская

Томский политехнический университет

E-mail: chubik@tpu.ru; markovng@tpu.ru; mir@tpu.ru; pts@tpu.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью развития российского инженерного образования в области системной инженерии, вызванной потребностью промышленности в специалистах по созданию сложных гетерогенных систем.

**Цель работы:** определить задачи развития инженерного образования в области системной инженерии в России в целом и в Томском политехническом университете в частности и выработать предложения по их решению.

**Методы исследования:** анализ средств массовой информации, анализ литературы, анализ образовательных программ, системный анализ.

**Результаты:** выполнено краткое введение в проблемы, принципы и методы системной инженерии; проанализировано состояние образования в этой области в России и за рубежом; рассмотрены инициативы и первый опыт Томского политехнического университета в области модернизации образовательных программ университета в соответствии с принципами системной инженерии.

**Выводы:** состояние дел по образованию в области системной инженерии в России можно оценить как катастрофическое. Российские вузы совместно с промышленностью должны предпринять ряд эффективных шагов по внедрению мирового опыта в области обучения и применения системной инженерии. Внедрение должно происходить поэтапно и непрерывно, на основе формирования типовых программ и дисциплин, с учётом специфики образовательных профилей. Элементы системной инженерии целесообразно и необходимо вводить в подготовку бакалавров. Элементы прикладного системного анализа могут быть встроены в виде модулей в существующие дисциплины младших курсов.

### Ключевые слова:

Системная инженерия, разработка сложных систем, инженерные образовательные программы, процессный подход, архитектурное проектирование.

### Введение

По данным CNN Money и PayScale профессия системного инженера в 2009 г. считалась в США наиболее престижной и перспективной, обойдя обычных лидеров – программистов, врачей, юристов и финансистов [1]. Парадоксально, но немногие в России вообще слышали об этой профессии, что подтверждают результаты исследования по России, проведенного ВЦИОМ. В отечественных рейтингах такая профессия не значится [2]. Неудивительно, что российские специалисты оценивают состояние дел по образованию в области системной инженерии в России как катастрофическое [2–5].

Суть катастрофы становится понятной, если принять во внимание, что в настоящее время во всём мире системная инженерия является методологической основой организации и осуществления деятельности по созданию и эксплуатации систем

любого класса и назначения [3]. Для многих крупных производственных корпораций мирового рынка, создающих сложные системы, обязательным требованием к инженерам является знание и применение принципов системной инженерии, а ведущие зарубежные технические университеты готовят системных инженеров по заказу таких корпораций [3, 4].

Статья посвящена введению в проблематику системной инженерии, анализу состояния образования в этой области в России и за рубежом, а также рассмотрению инициативы и первого опыта Томского политехнического университета в области разработки «Программы модернизации ООП университета в соответствии с принципами системной инженерии». Авторы полагают, что данная статья открывает целый цикл статей, связанных с этой проблематикой.

### Методология системной инженерии

Специалисты отмечают значительный рост сложности современных технических и социотехнических систем, принципиально комплексный, мультидисциплинарный характер их создания и эксплуатации, включающий в себя технические, политические, юридические, экологические, информационные, социальные и организационные аспекты. Количество таких систем нарастает лавинообразно, а сами системы превосходят исторические примеры как по сложности, так и по масштабу вовлечения разнородных организаций и даже государств. Среди технических примеров достаточно упомянуть строительство Большого адронного коллайдера, в строительстве и исследованиях с помощью которого участвовали более 10 тыс. учёных и инженеров из более чем 100 стран, а среди политико-социотехнических – построение единого Европейского союза из 27 европейских государств. В некоторых крупных проектах насчитываются тысячи подрядчиков, у каждого из которых часто не только свой национальный, но и свой профессиональный язык общения. Существенная характеристика абсолютного большинства создаваемых современных систем состоит в том, что они являются *программно-интенсивными*, в значительной мере основанными на компьютерах. Это обстоятельство не просто отмечается как один из многих факторов, оно заставляет пересматривать сложившиеся подходы к разработке и эксплуатации систем.

Указанные тенденции на фоне быстрого возрастания сложности возникающих при этом научно-технических и управленческих проблем закономерно привели к появлению и бурному развитию в XX в. двух смежных и взаимодополняющих научно-инженерных дисциплин: управлению проектами и системной инженерии. Считается, что решающим фактором, который привёл к появлению современной системной инженерии, стали крупные военно-инженерные проекты периода Второй мировой войны и срезу после её окончания. Называют два ключевых примера: Манхэттенский проект и проект по разработке ракетных вооружений, сочетающий в себе различные технологии, такие как системы управления и связи, радарные системы, системы аэродинамики, системы двигателей и ряд других.

На начальном этапе своего развития системная инженерия определялась как *комплексный подход к проектированию сложных систем*, а в качестве её ключевой цели указывалось соединение в единое целое собственно проектирования, нового научного аппарата, новой классификации частей, особой организованности и коллективных, бригадных методов работы [6].

Современных определений системной инженерии немало, и все они при формальном различии верно отражают те или иные аспекты этой дисциплины. В стандарте ISO/IEC/IEEE 24765:2010 системная инженерия определяется как *«междисци-*

*плинарный подход, определяющий полный набор технических и управленческих усилий, необходимых для преобразования совокупности потребностей и ожиданий клиента и имеющихся ограничений в решение и для поддержки этого решения на протяжении его жизни»*. Международный совет по системной инженерии (International Council on Systems Engineering, INCOSE) определяет её следующим образом: *«Системная инженерия – это междисциплинарный подход и средства для обеспечения реализации успешных систем. Системная инженерия нацелена на целостное и согласованное понимание потребностей заинтересованных сторон; исследование возможностей; документирование требований; синтез, верификацию, валидацию и развитие решений при рассмотрении задачи во всей полноте, от исследования замысла системы до её ликвидации»* [7].

Системная инженерия давно переросла рамки инженерной дисциплины и превратилась в междисциплинарный подход, активно использующий достижения различных отраслей знаний: программной инженерии, эргономики, управления проектами, управления качеством, математики, философии, лингвистики, теории принятия решений, операционного исчисления и др.

Наряду с общим практическим и методологическим назначением системной инженерии выделяют также шесть важных специальных областей её применения: бизнес-процессы и оценка функционирования (Business Processes and Operational Assessment); архитектура систем, решений и тестирования (System/Solution/Test Architecture); анализ стоимости жизненного цикла и соотношения прибылей и затрат (Life Cycle Cost & Cost-Benefit Analysis); обеспечение пригодности к обслуживанию и логистика (Serviceability/Logistics); моделирование, имитационное моделирование и анализ (Modeling, Simulation, & Analysis); управление рисками, конфигурацией, состоянием (Management: Risk, Configuration, Baseline).

К настоящему времени системная инженерия не просто получила безоговорочное практическое признание, но вышла на уровень международной стандартизации (за последние годы принято около трёх десятков международных стандартов в этой области) и даже пошла дальше: другие международные стандарты постепенно начинают меняться и приводиться в соответствие с «системноинженерными» стандартами [3, 5].

Системная инженерия предполагает гармонию в своём составе ряда подходов [8], среди которых наиболее важными являются следующие:

- переход от редуционистского к системному подходу;
- переход от структурного к процессному подходу;
- переход от одной группы описаний ко множественности групп описаний;
- переход от рабочего проектирования (конструирования, дизайна) к обязательному предварительному архитектурному;

- переход от непосредственной реализации к моделирующей реализации;
- переход от документоцентризма к датацентризму.

Системная инженерия сосредоточена на всестороннем рассмотрении полного жизненного цикла системы, включая обеспечение заданных функциональных возможностей и характеристик, соблюдение смет и графиков работ, верификацию, производство и сопровождение, обучение персонала, вывод из эксплуатации и утилизацию системы. В рамках этого подхода сформирован единый методологический базис для описания всех процессов жизненного цикла систем.

Наиболее сложные и запутанные взаимоотношения в исторической перспективе существуют между системной инженерией и управлением проектами. Обе дисциплины имеют внешне сходные цели и задачи, обе претендуют на охват комплекса проблем, связанных с созданием и эксплуатацией сложных систем различной природы. В то же время эти дисциплины возникли и развивались самостоятельно и относительно независимо, нарабатывая собственный понятийный аппарат, собственные стандарты, собственную систему обучения и сертификации и т. д. Несмотря на важную роль управления при создании продукции и предоставлении услуг системная инженерия – это более техническая, нежели управленческая дисциплина. Системная инженерия сосредоточена на *технических процессах*, таких как анализ требований, проектирование, конструирование, изготовление, верификация и валидация, функционирование, обслуживание и сопровождение, изъятие и списание, тогда как управление проектами сосредоточено на *организационных и управленческих процессах*, таких как приобретение и поставка; управление инфраструктурой, инвестициями, персоналом, рисками; планирование, оценка и контроль проекта и т. д. Если проектный менеджер в основном сосредоточен на *потоке работ*, то системный инженер – главным образом на *целевой системе*, при том что в целом различие между двумя этими видами деятельности значительно, однозначную, детерминированную границу между ними провести невозможно. В связи с этим уместно упомянуть, что с 1990-х гг. идёт постепенная конвергенция между системной инженерией и управлением проектами, а в последнее время вопрос об их взаимном влиянии и проникновении находится в стадии активного решения. Одним из признаков и одновременно следствием этого процесса является то, что абсолютно все классические процессы управления проектами вошли в ключевой стандарт по системной инженерии – ISO/IEC 15288 [9].

Вопрос о судьбе системной инженерии в нашей стране непрост. В СССР было реализовано множество сложных и крупных проектов, как гражданских, так и военных. Соответственно, был накоплен колоссальный опыт как в области управления проектами и процессами, так и в области соб-

ственно инженерной. Таким образом, вопрос о том, существовали ли в СССР системные инженеры (не по названию, а по сути), даже не рассматривается. Например, генеральный конструктор С.П. Королёв, согласно мнению современных специалистов, – это настоящий «стихийный» системный инженер. Слово «стихийный» означает отсутствие специального образования, поскольку ни системных инженеров, ни генеральных конструкторов в советских вузах, в отличие от зарубежных, не готовили.

В 1961 г. в СССР вышел перевод первой в мире книги по системной инженерии Г.Х. Гуда и Р.Э. Макола «System engineering». Редакции издательства «Советское радио» (в последующем «Радио и связь») не понравился буквальный перевод «системная инженерия», и был изобретён термин «системотехника» (по одним источникам автором слова был профессор Московского энергетического института Ф.Е. Темников, по другим – редактор русского перевода Г.Н. Поваров [6]). Термин «системотехника» вошел в историю становления системных исследований в нашей стране, кафедры системотехники появились во многих вузах. Термин со временем претерпел огромные изменения по сравнению с первоначальным смыслом. Поскольку в слове в явном виде звучала «техника», термин «системотехника» довольно быстро стал использоваться в основном в приложениях системных методов только к техническим направлениям и быстро стал утрачивать первоначальный смысл прикладной теории (технологии) систем, превратившись со временем в узкое понятие из области автоматизированных систем управления, а впоследствии мода на «системотехнику» прошла [2].

#### Подготовка специалистов по системной инженерии

За рубежом потребность индустрии в системных инженерах постоянно растёт и проблема подготовки системных инженеров приобретает всё большую актуальность. Сотрудничество западных университетов с промышленностью в этой связи находится на высоком уровне.

В настоящее время подготовку по системной инженерии в мире осуществляют около 250 университетов, среди которых примерно 60 европейских вузов, около 80 университетов из США и примерно 100 университетов из других стран мира [6]. Массачусетский технологический институт при реализации образовательных программ по системной инженерии сотрудничает с более чем 20 крупнейшими мировыми компаниями, а годовой бюджет этих программ составляет около ста миллионов долларов [4]. При этом речь идёт именно о подготовке системных инженеров, а не о простом наличии в учебном плане отдельной дисциплины введения в предмет.

В России системных инженеров не готовят. Учебно-методическое и другое ресурсное обеспечение такого образования планомерно не развивается. Вся работа ложится на плечи отдельных энтузиас-

тов. Благодаря их усилиям курс «Системная инженерия» читается сегодня в МФТИ, МИРЭА и МИ-СиС, в Уральском федеральном университете и ещё двух–трёх вузах. Программа обучения системной инженерии в 2012 г. включена в каталог учебных программ и курсов учебно-методического центра Всероссийского научно-исследовательского института по эксплуатации атомных электростанций (ВНИИАЭС). С 2012–2013 учебного года курс «Системная инженерия» преподаётся в магистерской подготовке ТПУ (направление 230400 «Информационные системы и технологии», профиль «геоинформационные системы»).

Иногда можно встретить информацию о том, что в тех или иных российских вузах готовят системных инженеров. В качестве примера можно привести две программы подготовки в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики: в «Центре авторизованного обучения IT-технологиям» и в «Академии методов и техники управления». Первая программа под «системным инженером» подразумевает «специалиста по проектированию, созданию и администрированию информационных систем», вторая – «специалиста по эксплуатации аппаратно-программных комплексов персональных ЭВМ и сетей». Очевидно, подобный казус является следствием слабой информированности некоторых вузов и общего разрыва с мировым опытом в этой области.

Целенаправленную подготовку системных инженеров даже в наиболее передовых вузах России пока заменяет включение в учебный план отдельной дисциплины обзорного характера под названием «системная инженерия» или «введение в системную инженерию». Это лучше, чем ничего, однако подобная дисциплина не способна сформировать соответствующего специалиста и может служить лишь импульсом к дальнейшему самообразованию.

В свою очередь, недостаток системного подхода в образовании, науке, экономической, общественной, государственной и международной деятельности приводит российское образование, науку, производство, экономику к функционированию на низких уровнях иерархии в интеграции в систему международного разделения труда, к специализации на низкотехнологичных, низкосистемных и низкооплачиваемых видах деятельности [10].

Специалисты считают [3], что при организации образования в области системной инженерии в России с учётом мирового опыта первоочередные усилия следует сосредоточить на:

- консолидации профессиональной и академической общественности, заинтересованной в преодолении кризиса инженерного образования в нашей стране;
- ускоренном изучении и внедрении передового зарубежного опыта организации обучения системной инженерии и подготовки системных инженеров;

- выделении пилотных направлений подготовки для апробации разрабатываемых учебных программ;
- ускоренном формировании комплекса эталонных учебно-методических материалов по системной инженерии, доступных в Интернет;
- специальной подготовке отечественных преподавателей по системной инженерии и смежным дисциплинам в ведущих зарубежных вузах, осуществляемой при поддержке российской промышленности и профессиональных организаций;
- переводе на русский язык комплекса лучших зарубежных учебников и книг по системной инженерии.

Важно не совершать прошлых ошибок, к которым можно отнести некритичное стремление к «самобытности». Большинство специалистов отмечает, что, например, введение термина «системотехника» было не последним фактором в печальной судьбе системной инженерии в СССР [2–6]. Однако авторы некоторых современных публикаций, верно описывая проблему и состояние дел, при этом призывают «не гнаться за импортными стандартами образования в области Systems Engineering», а создать «принципиально новое направление образования и деятельности», предлагая в качестве его названия термин «системостроение» [10]. Нужно ли говорить, что «системостроение» очевидно ничем не лучше «системотехники». Предложение «не следовать зарубежным путём», взамен создавая «принципиально новое направление», не учитывает имеющийся негативный опыт.

#### **Внедрение преподавания системной инженерии в образовательные программы ТПУ**

В 2012 г. в ТПУ инициирован проект с целью создания нормативной и методической базы для интеграции принципов системной инженерии в образовательные программы бакалавриата и магистратуры в области техники и технологий. Рабочей группой был выполнен анализ понятия «системная инженерия», сделан обзор текущего состояния дел по системной инженерии в мире и России, определение задач системы образования для становления системной инженерии в России, проведён анализ основных образовательных программ (ООП) магистратуры ТПУ с точки зрения преподавания системной инженерии, сформулированы предложения по организации преподавания системной инженерии в ТПУ [11].

В результате анализа образовательных программ магистерской подготовки в области техники и технологий в университете установлено, что они могут быть объединены в три группы.

*Первая группа* включает в себя образовательные программы, связанные с автоматизацией технологических процессов и IT-технологиями. Эти ООП в наибольшей мере отвечают требованиям подготовки магистров с компетенциями в области системной инженерии. Магистранты изучают дисциплины, в которых им преподаются основная

терминология, понятия, методы и подходы, используемые в том числе в системной инженерии. Хорошая основа закладывается уже на уровне предшествующей бакалаврской подготовки по этим направлениям.

*Вторая группа* объединяет образовательные программы направлений, ориентированных на формирование компетенций, необходимых для создания, эксплуатации и сервисного обслуживания устройств, аппаратов и агрегатов (например, «Теплоэнергетика и теплотехника», «Машиностроение» и др.). Эти ООП отличает сравнительно большая проектная практика. Почти во всех программах этой группы в той или мере представлены дисциплины профессионального цикла, где закладываются знания и навыки проектирования, конструирования, дизайна, а в отдельных случаях – элементы системного анализа. При бакалаврской подготовке студенты приобретают опыт проектирования объектов профессиональной деятельности, однако бакалавры и магистранты практически не погружены в предмет и стандарты системной инженерии и в малой степени владеют современной терминологией в этой сфере.

*Третья группа* включает в себя образовательные программы, доминирующим признаком которых является формирование компетенций, связанных с технологическими процессами и явлениями, относящимися к естественным наукам (например, «Материаловедение и технология материалов», «Химическая технология» и др.). Эти магистерские программы ориентированы на анализ процессов, проектирование и управление ими в сфере технологий. Как и программы второй группы, они не закладывают значимого базиса для системной инженерии.

Опираясь на зарубежный и отечественный опыт, а также на проведенный анализ, рабочая

группа сформулировала целый ряд предложений по становлению преподавания системной инженерии в ТПУ. Объем статьи не позволяет рассмотреть все эти предложения, однако можно особо отметить следующие.

1. Элементы системной инженерии целесообразно и необходимо вводить в подготовку бакалавров. Элементы прикладного системного анализа могут быть встроены в виде модулей в существующие дисциплины младших курсов. В рамках таких дисциплин также рекомендуется знакомить студентов с языками архитектурного описания систем (Archimate, SysML). Азы управления проектами должны даваться студентам в рамках многосеместрового модуля «Подготовка к комплексной инженерной деятельности».
2. Учитывая упомянутое разделение программ магистратуры в области техники и технологий по трем группам, целесообразно провести разработку трёх унифицированных дисциплин «Системная инженерия» разной сложности. При этом для второй и третьей групп программ магистратуры эти курсы могут иметь одинаковую теоретическую часть, но различаться по наполнению практической составляющей.

В рамках блока предложений особо рассмотрена проблема подготовки и переподготовки преподавательского состава.

С весеннего семестра 2013 г. на кафедре вычислительной техники ТПУ начато преподавание дисциплины «Системная инженерия» в рамках подготовки магистров по направлению 230400 «Информационные системы и технологии». Опыт преподавания, использованные подходы, выявленные проблемы и используемые решения требуют отдельного анализа и будут рассмотрены в следующей статье цикла.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Best jobs in America: Money/PayScale.com's list of great careers // CNN Money. 2009. URL: <http://money.cnn.com/magazines/money/mag/bestjobs/2009/snapshots/1.html> (дата обращения: 01.06.2013).
2. Холкин Д.В. Системная инженерия – новая профессия для новой энергетики // Энергоразвитие. – 2011. – № 3 (13). – С. 1–3.
3. Аркадов Г.В., Батоврин В.К., Сигов А.С. Системная инженерия, как важнейший элемент современного инженерного образования // Инженерное образование. – 2012. – № 9. – С. 12–25.
4. Батоврин В.К. Образование в системной инженерии – проблемы подготовки специалистов для создания конкурентоспособных систем // Открытое образование. – 2010. – № 6. – С. 164–172.
5. Батоврин В.К. Современное состояние международных стандартов системной и программной инженерии // Бизнес-информатика. – 2009. – № 3. – С. 3–10.
6. Батоврин В.К. Современная системная инженерия. Этапы развития // Датчики и системы. – 2013. – № 3. – С. 48–59.
7. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) version 1.0. 2012. URL: [www.sebokwiki.org](http://www.sebokwiki.org) (дата обращения: 01.06.2013).
8. Левенчук А.И. Десять гармонизированных подходов системной инженерии. 2009. URL: <http://ailev.livejournal.com/699665.html> (дата обращения: 01.06.2013).
9. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005 «Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем», ISO/IEC 15288:2008 – System Life Cycle Processes. – М: Стандартинформ, 2006. – 57 с.
10. Говоров В.Л., Галахов М.А., Иванов М.Г. Системные проблемы образования в России и предположения по их решению. 2012. URL: <http://sch.fizteh.ru/think-info/syst-obr-arph5fgmgji.pdf> (дата обращения: 01.06.2013).
11. Системная инженерия и задачи инженерной подготовки в ТПУ. Аналитический обзор. 2012. URL: [http://portal.tpu.ru:7777/standard/design/syst\\_engineerin/Tab/Syst.pdf](http://portal.tpu.ru:7777/standard/design/syst_engineerin/Tab/Syst.pdf) (дата обращения: 01.06.2013).

Поступила 15.07.2013 г.

## SYSTEMS ENGINEERING AND ITS APPLICATION TO EDUCATIONAL PROGRAMS OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

P.S. Chubik, N.G. Markov, E.A. Miroshnichenko, T.S. Petrovskaya

Tomsk Polytechnic University

**The urgency** of the work is caused by the need to develop Russian engineering education in the field of systems engineering caused by industry demand for specialists in developing complex heterogeneous systems.

**Study objective** is to determine tasks of engineering education development in the field of systems engineering in Russia as a whole and at the Tomsk Polytechnic University in particular, and to develop proposals to solve them.

**Study methods:** analysis of mass media, literature review, analysis of educational programs, systems analysis.

**Results:** The authors have carried out a brief introduction into the issues, principles and methods of systems engineering. The state of education in this field in Russia and abroad was analyzed. The initiatives and the first experience of the Tomsk Polytechnic University in modernization of educational programs in accordance with the principles of systems engineering were considered.

**Conclusions:** The state of education in the field of systems engineering in Russia can be considered as catastrophic. Russian universities and industry have to take a number of effective steps for implementing the world experience in the field of learning and application of systems engineering. Implementation should be gradual and continuous based on the creation of sample programs and courses, subject to specificity of educational profiles. It is appropriate and necessary to introduce systems engineering elements into bachelors training. Fundamentals of the applied system analysis can be integrated into existing courses of the first years as modules.

### Key words:

Systems engineering, development of complex systems, engineering educational programs, process approach, architectural design.

### REFERENCES

1. *Best jobs in America: Money/PayScale.com's list of great careers.* CNN Money. 2009. Available at: <http://money.cnn.com/magazines/moneymag/bestjobs/2009/snapshots/1.html> (accessed 01 June 2013).
2. Holkin D.V. Sistemnaya inzheneriya – novaya professiya dlya novoy energetiki [Systems Engineering is a new profession for new power engineering]. *Energorazvitie*, 2011, no. 3 (13), pp. 1–3.
3. Arkadov G.V., Batovrin V.K., Sigov A.S. Sistemnaya inzheneriya, kak vazhneyshiy element sovremennogo inzhenernogo obrazovaniya [Systems Engineering as an essential element of modern engineering education]. *Inzhenernoe obrazovanie*, 2012, no. 9, pp. 12–25.
4. Batovrin V.K. Obrazovanie v sistemnoy inzheneriy – problemy podgotovki spetsialistov dlya sozdaniya konkurentosposobnykh sistem [Education in systems engineering – the problems of training engineers for developing competitive systems]. *Otkrytoe obrazovanie*, 2010, no. 6, pp. 164–172.
5. Batovrin V.K. Sovremennoe sostoyanie mezhdunarodnykh standartov sistemnoy i programmnoy inzhenerii [The current state of international standards of systems and software engineering]. *Biznes-informatika*, 2009, no. 3, pp. 3–10.
6. Batovrin V.K. Sovremennaya sistemnaya inzheneriya. Etapy razvitiya [Modern Systems Engineering. Stages of evolution]. *Datchiki i sistemy*, 2013, no. 3, pp. 48–59.
7. *Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) version 1.0.* 2012. Available at: [www.sebokwiki.org](http://www.sebokwiki.org) (accessed 01 June 2013).
8. Levenchuk A.I. Desyat harmonizirovannykh podkhodov sistemnoy inzhenerii [Ten harmonized approaches of systems engineering]. 2009. Available at: <http://ailev.livejournal.com/699665.html> (accessed 01 June 2013).
9. GOST R ISO/MEK 15288–2005 *Informatsionnaya tehnologiya. Sistemnaya inzheneriya. Protsessy zhiznennogo tsikla system* [State Standard 15288–2005. Information technology. Systems Engineering. System Life Cycle Processes] ISO/IEC 15288:2008 – System Life Cycle Processes. Moscow, Stadartinform, 2006. 57 p.
10. Govorov V.L., Galahov M.A., Ivanov M.G. *Sistemnye problemy obrazovaniya v Rossii i predpolozheniya po ikh resheniyu* [Systemic problems of education in Russia and assumptions for dealing with them]. 2012. Available at: <http://sch.fizteh.ru/think-info/syst-obr-arph5fgmgji.pdf> (accessed 01 June 2013).
11. *Sistemnaya inzheneriya i zadachi inzhenernoy podgotovki v TPU. Analiticheskiy obzor* [Systems Engineering and objectives of engineering education in the TPU. Analytical review]. 2012. Available at: [http://portal.tpu.ru:7777/standard/design/syst\\_engineerin/Tab/Syst.pdf](http://portal.tpu.ru:7777/standard/design/syst_engineerin/Tab/Syst.pdf) (accessed 01 June 2013).

---

# Наши юбиляры

## ПРОФЕССОРУ В.З. ЯМПОЛЬСКОМУ – 75 ЛЕТ



В июне 2013 г. исполнилось 75 лет со дня рождения Владимира Захаровича Ямпольского, экс-директора Института «Кибернетический центр» Томского политехнического университета (ТПУ), заслуженного профессора ТПУ и профессора-консультанта кафедры оптимизации систем управления.

Учебная и научная деятельность В.З. Ямпольского связана с Томским политехническим, в который он поступил в 1955 г. Окончил электромеханический факультет ТПИ (1960). С 1960 г. – ассистент, старший преподаватель, с 1963 г. – аспирант, с 1966 г. – доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ТПИ. Кандидат технических наук (1965). Доктор технических наук (1974), профессор (1975). С 1969 по 2001 гг. – заведующий кафедрой оптимизации систем управления.

В 1967 г. возглавил созданную по инициативе ректора А.А. Воробьева лабораторию управления вузом. Лаборатория и кафедра в последующие годы послужили основой для создания Учебно-научно-производственного комплекса «Кибернетика». С 1975 г. В.З. Ямпольский – директор Вычислительного центра ТПИ, директор Учебно-научно-производственного комплекса «Кибернетика». Впоследствии (с 1988 г.) центр был преобразован в Институт «Кибернетический центр» ТПУ.

С 1973 по 1995 гг. Владимир Захарович в качестве Главного конструктора руководил разработкой отраслевой АСУ Минвуза РСФСР. В этой крупной программе участвовали 12 вузов гг. Москвы, Ленинграда, Воронежа, Свердловска и др.; ТПУ являлся головной организацией. С 1988 г. В.З. Ямпольский – директор Института «Кибернетический центр», проректор по учебной работе и

информатизации ТПУ. С 2000 г. – вице-президент ОАО «Восточная нефтяная компания» по новым технологиям, по совместительству – директор Института «Кибернетический центр» ТПУ.

Основное научное направление деятельности в период с 1975 по 1985 гг. – оптимизация систем управления и информационные технологии. Затем научные интересы профессора В.З. Ямпольского сместились в сферу системного анализа оптимизационных моделей обоснования решений, кластер-анализа. На очередном этапе развития микропроцессорной техники и информационных технологий (1985–2000 гг.) главным направлением исследований и разработок возглавляемой им научной школы стали автоматизированные системы управления на базе сетей ЭВМ. Начиная с 2002 г. Владимир Захарович руководит работами по созданию систем управления знаниями, семантических Web-порталов на основе онтологических моделей.

Профессором В.З. Ямпольский опубликовано более 340 научных работ, в том числе 11 монографий. Под его руководством подготовлено 55 кандидатов и 5 докторов наук, в настоящее время он

руководит 3 аспирантами и 2 докторантами кафедры ОСУ. Является действительным членом Академии технологических наук РФ (1992), Международной академии наук высшей школы (1994), Международной академии информатизации (1995). Заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1989), Почетный профессор ТПУ (2006).

В.З. Ямпольский, по инициативе и при непосредственном участии которого был построен четырехэтажный корпус института «Кибернетический центр» является действительно во всех смыслах его фундатором и пионером внедрения информационных технологий в ТПИ и ТПУ. Под его руководством институт и кафедра ОСУ занимали достойные места в составе учебных и научных подразделений ТПУ, а достижения института получили широкую известность в промышленности, в системе высшего инженерного образования России, а также в системе институтов СО РАН.

Коллектив кафедры оптимизации систем управления сердечно поздравляет Владимира Захаровича с юбилеем и желает новых творческих успехов в учебной, научной и спортивной деятельности!

# Сведения об авторах

- Аврамчук Валерий Степанович**, 1978 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 41-89-07. E-mail: avs@tpu.ru. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов.
- Аксенов Сергей Владимирович**, 1983 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры оптимизации систем управления Института Кибернетики ТПУ. Р.т. 42-04-59. E-mail: aхоepowsw@tpu.ru. Область научных интересов: экспертные системы, распознавание образов, параллельные вычисления.
- Баласанян Сейран Шамирович**, 1945 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий, информатики и автоматизированных систем, заместитель директора по научной работе Капанского филиала Государственного инженерного университета Армении, г. Ереван. Р.т. 8-10-(374-77)-43-85-90. E-mail: sunicom@syunik.am. Область научных интересов: теория систем и системный анализ, исследование надежности и эффективности сложных технических систем методом компьютерного моделирования.
- Беккер Вячеслав Филиппович**, 1948 г.р., канд. техн. наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета. Р.т. 8-(342-4)-26-90-90. E-mail: bekker@bf.pstu.ac.ru. Область научных интересов: совместное проектирование технологии и систем управления.
- Бильфельд Николай Валентинович**, 1954 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета. Р.т. 8-(342-4)-26-90-90. E-mail: bilfeld@mail.ru. Область научных интересов: информатизация и управление техническими системами.
- 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.
- Геворгян Эрмине Михайловна**, 1979 г.р., соискатель зав. лаб. «Моделирование систем» кафедры информационных технологий, информатики и автоматизированных систем Капанского филиала Государственного инженерного университета Армении, г. Ереван. Р.т. 8-10-(374-28)-55-46-80. E-mail: hermine79@rambler.ru. Область научных интересов: компьютерное моделирование сложных технологических систем.
- Голобоков Юрий Николаевич**, 1982 г.р., инженер информационного отдела Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-12-95. E-mail: golobokov@tpu.ru. Область научных интересов: системы автоматизации научных экспериментов для установок управляемого термоядерного синтеза, включая программное и аппаратное обеспечение. Программное обеспечение систем управления, функционирующих в реальном масштабе времени.
- 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, нейрорволюционные алгоритмы, вейвлет-анализ.
- Демин Антон Юрьевич**, 1973 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-63-34. E-mail: ad@tpu.ru. Область научных интересов: анализ и представление программ в структурно-графической форме, компьютерная графика.
- Дорофеев Вадим Анатольевич**, 1980 г.р., ст. преподаватель кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-07-47. E-mail: dva@tpu.ru. Область научных интересов: параллельные вычисления, телекоммуникационные технологии.
- Евстифеев Дмитрий Александрович**, 1988 г.р., студент кафедры «Электроника и автоматика физических установок» Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-12-95. E-mail: c001er1988@sibmail.com. Область научных интересов: системы автоматизации и диспетчеризации технологических процессов.
- Заикин Иван Анатольевич**, 1986 г.р., ассистент кафедры оптимизации систем управления, программист лаборатории когнитивных систем и управления знаниями Института кибернетики ТПУ. Р.т.: 70-17-77, доб. 1138. E-mail: zaikin@tpu.ru. Область научных интересов: объектно-ориентированный анализ и проектирование, онтологическое моделирование, семантические технологии.
- Казьмин Виктор Павлович**, 1943 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 41-89-07. E-mail: kvp@tpu.ru. Область научных интересов: диагностика поршневых машин, теория автоматического управления.
- Камаев Дмитрий Степанович**, 1973 г.р., инженер филиала «Ависма» ОАО «Корпорация ВСМПО-Ависма», г. Березники. Р.т. 8-(342-4)-20-39-70. E-mail: kwad-73@mail.ru. Область научных интересов: системы управления технологическими процессами.

- Китаева Анна Владимировна**, 1957 г.р., д-р физ.-мат. наук, доцент кафедры инженерного предпринимательства Института социально-гуманитарных технологий ТПУ. Р.т. 56-35-29. E-mail: kit1157@yandex.ru. Область научных интересов: непараметрическое и робастное оценивание характеристик случайных процессов, принятие решений в условиях неопределенности, математическое моделирование социальных и экономических систем.
- 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: kobaigorov@tpu.ru. Область научных интересов: системы поддержки принятия решений при планировании геолого-технических мероприятий.
- Кочегурова Елена Алексеевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 41-89-07. E-mail: kocheg@mail.ru. Область научных интересов: обработка информации в реальном масштабе времени, нелинейные преобразования данных.
- Лощухина Татьяна Евгеньевна**, магистрант кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 67-04-61. E-mail: Loshuhina.Tatyana@yandex.ru. Область научных интересов: параллельные вычисления.
- Мальшенко Александр Максимович**, 1937 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры интегрированных компьютерных систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-18-37. E-mail: mam@tpu.ru. Область научных интересов: теория автоматического управления, системный анализ, управление подвижными объектами.
- Марков Николай Григорьевич**, 1950 г.р., д-р. техн. наук, зав. кафедрой вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. Р.т. 61-20-71. E-mail: markovng@tpu.ru. Область научных интересов: корпоративные информационные системы.
- Мартынова Юлия Алексеевна**, ассистент кафедры автоматизации и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-17-77, доб. 2205. E-mail: martynova.ya@gmail.com. Область научных интересов: оптимизация маршрутных схем городского пассажирского транспорта, исследование пассажиропотоков, имитационное моделирование транспортных систем.
- Мезенцев Антон Алексеевич**, 1984 г.р., инженер-проектировщик, ассистент кафедры «Электроника и автоматика физических установок» Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-12-95. E-mail: mezentsev.anton@gmail.com. Область научных интересов: многотерминальные пульты управления экспериментальных физических установок.
- Мирошниченко Евгений Александрович**, 1972 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-17-77, доб. 2239. E-mail: mir@tpu.ru. Область научных интересов: системная и программная инженерия; проектирование информационных систем.
- Назаров Анатолий Андреевич**, 1947 г.р., д-р техн. наук, профессор, зав. каф теории вероятностей и математической статистики факультета прикладной математики и кибернетики ТГУ. Р.т. 52-95-99. E-mail: anazarov@fpmk.tsu.ru. Область научных интересов: математическое моделирование, прикладной вероятностный анализ, теория случайных процессов, теория массового обслуживания.
- Орлов Андрей Александрович**, 1987 г.р., ассистент каф. промышленной электроники Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. Р.т. 56-16-31. E-mail: d1scnc@gmail.com. Область научных интересов: алгоритмы и методы искусственного интеллекта, индуктивное моделирование, объектно-ориентированный анализ и проектирование сложных систем.
- Осокин Александр Николаевич**, 1947 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-16-09. E-mail: osokin@vt.tpu.ru. Область научных интересов: создание алгоритмов сжатия информации, их программная и аппаратная реализация; помехоустойчивое кодирование сигналов.
- Павлов Вадим Михайлович**, 1965 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроника и автоматика физических установок» Физико-технического института ТПУ. Р.т. 42-12-95. E-mail: pavlov@tpu.ru. Область научных интересов: разработка методов и средств повышения информационной эффективности систем автоматизации научных исследований для экспериментальных физических установок, включая их техническое, алгоритмическое и программное обеспечение.
- Петровская Татьяна Семёновна**, канд. техн. наук, зам. проректора по образовательной и международной деятельности ТПУ. Р.т. 56-38-15. E-mail: pts@tpu.ru. Область научных интересов: материаловедение, качество и стратегии совершенствования инженерного образования.
- 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, топология и архитектура вычислительных систем, компактные разбиения объектов территориально распределенных систем.
- Погребной Андрей Владимирович**, 1992 г.р., магистрант Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-07-27. E-mail: av-pogrebnoy@gmail.com. Область научных интересов: информационные технологии, моделирование и 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. 42-05-09. E-mail: vkr@tpu.ru. Область научных интересов: дискретная математика, математическое программирование, моделирование, автоматизированное проектирование распределенных систем реального времени.

- Полищук Владимир Иосифович**, 1966 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетических сетей и электротехники Энергетического института ТПУ. Р.т. 56-37-63. E-mail: polischukvi@tpu.ru. Область научных интересов: развитие теории построения релейной защиты и диагностики синхронных машин.
- Рогожников Евгений Васильевич**, 1989 г.р., аспирант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 41-33-98. E-mail: udzhon@mail.ru. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, телекоммуникационные системы.
- Романова Екатерина Валерьевна**, 1988 г.р., аспирант кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-13-53. E-mail: Romanova88EV@mail.ru. Область научных интересов: гидродинамические исследования скважин месторождений углеводородов.
- Савельев Алексей Олегович**, 1987 г.р., ассистент 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.
- 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@ignd.tpu.ru. Область научных интересов: мониторинг разработки месторождений углеводородов, системный анализ, идентификация и управление.
- Сидоров Дмитрий Владимирович**, 1984 г.р., канд. техн. наук, инженер-электроник отдела Информационно-вычислительной техники ОАО «Томское пиво». Р.т. 41-63-80. E-mail: gauso@mail.ru. Область научных интересов: разработка алгоритмов сжатия изображений, оценка качества изображений.
- Силич Виктор Алексеевич**, 1946 г.р., д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры оптимизации систем управления Института Кибернетики ТПУ. Р.т. 42-07-60. E-mail: vas@tpu.ru. Область научных интересов: интеллектуальная поддержка принятия решений, системный анализ, технологии и системы, основанные на знаниях.
- Силич Мария Петровна**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизации обработки информации Томского университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 70-15-91. E-mail: smp@muma.tusur.ru. Область научных интересов: системный анализ, экспертные системы, инженерия знаний.
- Симонян Саркис Оганесович**, 1946 г.р., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий и автоматизации Государственного инженерного университета Армении, г. Ереван, Заслуженный деятель науки Республики Армения, академик Инженерной Академии Армении. Р.т. +8-10-(374-10)-58-27-67. E-mail: ssimonyan@seua.am. Область научных интересов: системный анализ, моделирование, оптимизация, управление, дифференциальные преобразования.
- Слободян Степан Михайлович**, 1946 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры геологии разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 70-17-77, доб. 3428. E-mail: sms\_46@ngs.ru. Область научных интересов: анализ стохастических процессов и динамических систем.
- Спицын Владимир Григорьевич**, 1948 г.р., д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-16-09. E-mail: spvg@tpu.ru. Область научных интересов: рассеяние радиоволн на возмущениях ионосферной плазмы, создаваемых космическим аппаратом; взаимодействие волн в плазме; нейронные сети; генетические алгоритмы; обработка и анализ изображений.
- Степанова Наталья Викторовна**, 1988 г.р., аспирант кафедры высшей математики Физико-технического института ТПУ. Р.т. 563-593. E-mail: natalia0410@rambler.ru. Область научных интересов: системный анализ, теория управления, экономико-математическое моделирование.
- Терпугов Александр Федорович**, 1939–2009 гг., д-р физ.-мат. наук, заслуженный профессор Томского государственного университета, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов: математические модели экономических процессов, теория массового обслуживания.
- Убайчин Антон Викторович**, мл. науч. сотр. СКБ «Смена» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 25-33-60. E-mail: dialog@mail.ru. Область научных интересов: системы раннего обнаружения заболеваний пациентов методами пассивной локации.
- Ушарова Дарья Николаевна**, аспирант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Р.т. 41-33-98. E-mail: udn@sibmail.com. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, телекоммуникационные системы.
- Хамухин Александр Анатольевич**, 1954 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-04-05. E-mail: aaxtpu@tpu.ru. Область научных интересов: исследование и разработка компьютерных моделей и методов моделирования.
- Хаустов Павел Александрович**, 1990 г.р., аспирант кафедры вычислительной техники Института кибернетики ТПУ. Р.т. 70-16-09. E-mail: eXceibot@sibmail.com. Область научных интересов: искусственный интеллект, нейронные сети, распознавание образов, структуры данных, абстрактные типы данных, теория графов, динамическое программирование, теория вероятности, нейроэволюционные алгоритмы.
- Цупин Анатолий Андреевич**, 1948 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института ТПУ. Р.т. 56-32-67. E-mail: sms\_46@ngs.ru. Область научных интересов: визуальные и инструментальные лазерные навигационные системы.

**Черникова Яна Евгеньевна**, 1992 г.р., магистрант факультета прикладной математики и кибернетики кафедры теории вероятности и математической статистики ТГУ. Р.т. 65-31-64. E-mail: evgenevna.92@mail.ru. Область научных интересов: теория вероятностей, теория массового обслуживания, исследование RQ-систем.

**Чубик Петр Савельевич**, 1954 г.р., д-р. техн. наук, ректор ТПУ. Р.т. 70-17-79. E-mail: chubik@tpu.ru. Область научных интересов: управление в образовании, качество инженерного образования, экологизация и оптимизация бурения.

**Шалаев Юрий Николаевич**, 1943 г.р., канд. тех. наук, доцент кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-09-27. E-mail: shalaev@tpu.ru. Область научных интересов: моделирование, численные методы, теория управления.

**Ямпольский Владимир Захарович**, 1938 г.р., д-р техн. наук, профессор-консультант кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики ТПУ. Р.т. 42-44-03. E-mail: yvz@tpu.ru. Область научных интересов: системы управления знаниями, моделирование нефтегазовых месторождений.

**Редактирование и корректура** *А.С. Глазырин*  
**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Перевод на англ. язык** *С.В. Жаркова*

Подписано к печати 18.12.2013. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 21,87. Уч.-изд. л. 19,78.  
Заказ 1451-13. Тираж 500 экз.

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822) 563-291, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru), [izv@tpu.ru](mailto:izv@tpu.ru)