

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Отделение нанотехнологий и информационных технологий

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН

# ТРУДЫ СПИИРАН

[proceedings.spiiras.nw.ru](http://proceedings.spiiras.nw.ru)



**ВЫПУСК 2(33)**



Санкт-Петербург  
2014

18+

# Труды СПИИРАН

Выпуск № 2(33), 2014

Научный, научно-образовательный, междисциплинарный журнал с базовой специализацией в области информатики, автоматизации и прикладной математики

Журнал основан в 2002 году

## Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук  
(СПИИРАН)

## Главный редактор

Р.М. Юсупов, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С-Петербург, РФ

## Редакционная коллегия

**А.А. Ашимов**, академик национальной академии наук Республики Казахстан д-р техн. наук, проф., Алматы, Казахстан

**С.Н. Баранов**, д-р физ.-мат. наук, проф.,

С.-Петербург, РФ

**Н.П. Веселкин**, академик РАН, д-р мед. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В.И. Городецкий**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**О.Ю. Гусихин**, Ph.D., Диаборн, США

**В. Делич**, д-р техн. наук, проф., Нови-Сад, Сербия

**А.Б. Долгий**, Dr. Habil., проф., Сент-Этьен, Франция

**Д.А. Иванов**, д-р экон. наук, проф., Берлин, Германия

**О.С. Ипатов**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В.П. Леонов**, д-р пед. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Г.А. Леонов**, член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**К.П. Марков**, Ph.D., доцент, Аизу, Япония

**Ю.А. Меркурьев**, член-корр. Латвийской академии наук, Dr. Habil., проф., Рига, Латвия

**Н.А. Молдовян**, д-р техн. наук, проф.,

С.-Петербург, РФ

**А.А. Петровский**, д-р техн. наук, проф., Минск, Беларусь

**В.В. Попович**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В.А. Путилов**, д-р техн. наук, проф., Апатиты, Россия

**А.Л. Ронжин** (зам. главного редактора),

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**А.И. Рудской**, член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В.А. Сарычев**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В. Гурев**, академик Болгарской академии наук,

д-р техн. наук, проф., София, Болгария

**В.А. Скормин**, Ph.D., проф., Бингемптон, США

**А.В. Смирнов**, д-р техн. наук, проф.,

С.-Петербург, РФ

**Б.Я. Советов**, академик РАО, д-р техн. наук,

проф., С.-Петербург, РФ

**В.А. Соифер**, член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Самара, РФ

**Б.В. Соколов**, д-р техн. наук, проф.,

С.-Петербург, РФ

**А.В. Тимофеев**, д-р техн. наук, проф.,

С.-Петербург, РФ

**Л.В. Уткин**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**А.Л. Фрадков**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Н.В. Хованов**, д-р физ.-мат. наук, проф.,

С.-Петербург, РФ

**Д.С. Черешкин**, д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

**Л.Б. Шереметов**, д-р техн. наук, Мехико, Мексика

**А.В. Язенин**, д-р техн. наук, профессор, Тверь, РФ

## Адрес редакции

199178, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39,

email: [publ@iias.spb.su](mailto:publ@iias.spb.su), сайт: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

Подписано к печати 27.05.2014. Формат 60x90 1/16. Усл. печ. л. 15,0. Заказ № 259. Тираж 200 экз., цена свободная  
Отпечатано в Редакционно-издательском центре ГУАП, 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, д. 67

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций,  
свидетельство ПИ № ФС77-41695 от 19 августа 2010 г.

Подписной индекс 29393 по каталогу «Почта России»

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 2014

Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе печатного периодического издания-журнала «Труды СПИИРАН» статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием имени автора статьи и печатного периодического издания-журнала «Труды СПИИРАН»

# SPIIRAS Proceedings

Issue № 2(33), 2014

Scientific, educational, and interdisciplinary journal primarily specialized  
in computer science, automation, and applied mathematics

Trudy SPIIRAN ♦ Founded in 2002 ♦ Труды СПИИРАН

---

## Founder and Publisher

Federal State Budget Institution of Science  
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences  
(SPIIRAS)

---

## Editor-in-Chief

R.M. Yusupov, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia

---

## Editorial Board Members

**A.A. Ashimov**, Prof., Dr. Sci., Academician  
of the National Academy of Sciences of the  
Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan  
**S.N. Baranov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**N.P. Veselkin**, Prof., Dr. Sci., Academician of RAS,  
St. Petersburg, Russia  
**V.I. Gorodetski**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**O.Yu. Gusikhin**, Ph. D., Dearborn, USA  
**V. Delic**, Prof., Dr. Sci., Novi Sad, Serbia  
**A. Dolgui**, Prof., Dr. Habil., St. Etienne, France  
**D.A. Ivanov**, Prof., Dr. Habil., Berlin, Germany  
**O.S. Ipatov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**V.P. Leonov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**G.A. Leonov**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS,  
St. Petersburg, Russia  
**K.P. Markov**, Assoc. Prof., Ph.D., Aizu, Japan  
**Yu.A. Merkur'yev**, Prof., Dr. Habil., Corr. Member  
of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia  
**N.A. Moldovian**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg,  
Russia  
**A.A. Petrovsky**, Prof., Dr. Sci., Minsk, Belarus  
**V.V. Popovich**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**V.A. Putilov**, Prof., Dr. Sci., Apatity, Russia

**A.L. Ronzhin** (Deputy Editor-in-Chief),  
Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**A.I. Rudskoi**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS,  
St. Petersburg, Russia  
**V.A. Saruchev**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**V. Sgurev**, Prof., Dr. Sci., Academician of the Bulgarian  
academy of sciences, Sofia, Bulgaria  
**V. Skormin**, Prof., Ph.D., Binghamton, USA  
**A.V. Smirnov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**B.Ya. Sovetov**, Prof., Dr. Sci., Academician of RAE,  
St. Petersburg, Russia  
**V.A. Soyfer**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS,  
Samara, Russia  
**B.V. Sokolov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**A.V. Timofeev**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**L.V. Utkin**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**A.L. Fradkov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**N.V. Hovanov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**D.S. Chereshekin**, Prof., Dr. Sci., Moscow, Russia  
**L.B. Sheremetov**, Assoc. Prof., Dr. Sci., Mexico,  
Mexico  
**A.V. Yazenin**, Prof., Dr. Sci. Tver, Russia

---

## Editorial Board's address

14-th line VO, 39, SPIIRAS, St. Petersburg, 199178, Russia,  
email: [publ@ias.spb.su](mailto:publ@ias.spb.su), web: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

---

Signed to print 27.05.2014

Printed in Publishing center GUAP, 67, B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia

---

The journal is registered in Russian Federal Agency for Communications and Mass-Media Supervision,  
certificate ПИ № ФС77-41695 dated August 19, 2010 r.

Subscription Index 29393, Russian Post Catalog

© Federal State Budget Institution of Science  
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Батенков К.А. ПРОБЛЕМА СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ДИСКРЕТНОГО КАНАЛА СВЯЗИ ПО ИНФОРМАЦИОННЫМ КРИТЕРИЯМ	5
Новиков Б.А., Судос И.В. ИНДЕКСИРОВАНИЕ ДАННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ	24
Мусаев А.А. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ИНЕРЦИОННОСТИ ХАОТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	48
Игнатьев М.Б., Катермина Т.С. МЕТОД ИЗБЫТОЧНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И КОРРЕКЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ. ЧАСТЬ 2	60
Кочура А.Е., Подколызина Л.В., Ивакин Я.А., Нидзиев И.И. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ С ВАРЬИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ, ИСПОЛЗУЮЩЕГО РАЗРЕЖЕННОСТЬ МАТРИЦЫ	79
Шпаков В.М. ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРАНСФОРМАЦИОННЫХ ПРАВИЛ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ	99
Козыренко Н.С., Мещеряков Р.В., Ходашинский И.А., Ануфриева Н.Ю. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА	117
Никонорова М.Л., Пичугин Ю.А., Тишков А.В. МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ МЕДИЦИНСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ КОМПЬЮТЕРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ	147
Крижановский А.А., Смирнов А.В., Круглов В.М., Крижановская Н.Б., Кипяткова И.С. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ СЛОВАРНЫХ ПОМЕТ ИЗ РУССКОГО ВИКИСЛОВАРЯ	164
Кобозева И.М., Сидоров Г.О., Циммерлинг А.В. МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ДИАЛОГОМ В СИСТЕМЕ ОБЩЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ С ПОДВИЖНЫМ РОБОТОМ-ГИДОМ	186
Чубраева Л.И., Ронжин А.Л., Шишлаков А.В., Ронжин Ал.Л., Шишлаков В.Ф. КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	207
Паламарь И.Н., Юлин С.С. ПОРОЖДАЮЩАЯ ГРАФИЧЕСКАЯ ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ ГЛАВНЫХ МНОГООБРАЗИЙ	227
Басов О.О., Богданов С.П., Иванов А.А. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ГРАФОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТАКТИЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ	248

## CONTENTS

Batenkov K.A. DISCRETE CHANNEL FUNCTIONAL PART SYNTHESIS PROBLEM UNDER INFORMATION CRITERIONS	5
Novikov B.A., Sudos I.V. DATA INDEXING IN HIGH DIMENSIONAL SPACE	24
Musaev A.A. NUMERICAL ANALYSIS OF CHAOTIC PROCESSES PERSISTENCE	48
Ignat'ev M.B., Katermina T.S. THE REDUNDANT VARIABLES METHOD FOR CHECKING AND CORRECTION OF COMPUTING PROCESSES IN REAL TIME. PART 2	60
Kochura A.E., Podkolzina L.V., Ivakin Y.A., Nidziev I.I. DEVELOPMENT OF ALGORITHM OF THE DECISION OF SYSTEMS LINEAR EQUATIONS WITH THE VARIED PARAMETERS, USING THE MATRIX SPARSENESS	79
Shpakov V.M. ABOUT USE OF TRANSFORMATIONAL RULES FOR COMPUTER IMPLEMENTATION OF CONTINUOUS PROCESSES	99
Kozyrenko N.K., Meshcheryakov R.V., Hodashinsky I.H., Anufrieva N.A. MATHEMATICAL MODEL AND ALGORITHMS OF PEOPLE HEALTH EVALUATION	117
Nikonorova M.L., Pichugin Yu.A., Tishkov A.V. METHODOLOGY OF TEACHING MEDICAL STUDENTS OF COMPUTER MODELING	147
Krizhanovsky A.A., Smirnov A.V., Kruglov V.M., Krizhanovskaya N.B., Kipyatkova I.S. AUTOMATIC EXTRACTION OF CONTEXT LABELS FROM THE RUSSIAN WIKTIONARY	164
Kobozeva I.M., Sidorov G., Zimmerling A.V. MODULE FOR DIALOG MANAGEMENT IN THE INTERACTION SYSTEM BETWEEN USER AND MOBILE ROBOTIC GUIDE	186
Chubraeva L.I., Ronzhin A.L., Shyshlakov A.V., Ronzhin Al.L., Shyshlakov V.F. THE CONCEPT OF BUILDING INTELLIGENT SYSTEMS MANAGEMENT FOR PROTECTED OBJECTS DECENTRALIZED ENERGY	207
Nikolaevna I.N., Yulin S.S. GENERATIVE PROBABILISTIC GRAPHICAL MODEL BASE ON THE PRINCIPAL MANIFOLDS	227
Basov O.O., Bogdanov S.P., Ivanov A.A. GRAPH THEORY PRACTICE FOR TACTILE CHARACTERISTICS MEASURING MEANS DESIGN	248

К.А. БАТЕНКОВ  
**ПРОБЛЕМА СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ  
ДИСКРЕТНОГО КАНАЛА СВЯЗИ ПО ИНФОРМАЦИОННЫМ  
КРИТЕРИЯМ**

---

*Батенков К.А. Проблема синтеза функциональных узлов дискретного канала связи по информационным критериям.*

**Аннотация.** Рассмотрена постановка задачи синтеза систем передачи информации по байесовским критериям при различных функциях потерь. Установлено, что для достаточно общих условий существуют значительные отличия в структуре и параметрах синтезируемых систем передачи информации по байесовским критериям при использовании простых функций потерь и функции неопределенности.

**Ключевые слова:** система передачи информации, байесовский критерий, функция потерь, функция правдоподобия, средняя вероятность ошибки, относительная взаимная информация.

*Batenkov K.A. Discrete channel functional part synthesis problem under information criterions.*

**Abstract.** Communication system synthesis task statement under Bayesian criterions with variant loss functions is considered. Significant differences in communication system structure and parameters synthesized under Bayesian criterions with simple loss function and uncertainty function are obtained at sufficiently general conditions.

**Keywords:** communication system, Bayesian criterion, loss function, likelihood function, mean error probability, relative transmitted information.

---

**1. Введение.** Основная цель, преследуемая при проектировании, разработке и реализации систем связи, – это эффективное использование доступного ресурса для надежной передачи информации от источника к получателю. Причем в практически реализованных средствах связи допустимо наличие некоторой неопределенности в принимаемых сообщениях при заданном количестве потребляемого ресурса канала связи [13]. Современные системы связи оперируют четырьмя составляющими ресурса: пространство, время, частота и энергия (мощность), поскольку они являются определяющими параметрами излучаемых электромагнитных сигналов, использующихся для передачи информации по каналам связи [10]. Следовательно, задача системы связи заключается в устранении неопределенности о передаваемой информации, вызванной главным образом внутренними особенностями системы, внешними воздействиями посторонних средств, а также влиянием параметров окружающей среды, посредством которой осуществляется передача сообщений, в рамках предоставляемого ресурса канала связи.

С другой стороны большинство задач, связанных с построением оптимальных систем передачи информации, решаются по критериям, лишь опосредованно зависящим от неопределенности о передаваемых сообщениях, например, таких как минимумы средней вероятности ошибки или среднеквадратического отклонения. При этом большинство работ предполагает монотонную зависимость между неопределенностью и более простыми показателями качества, что зачастую оказывается не совсем корректным. Данное обстоятельство и порождает весьма серьезную проблему синтеза функциональных узлов дискретного канала связи, заключающуюся, с одной стороны, в необходимости использования критериев, учитывающих потери информации в канале связи, а с другой – повсеместным применением аналитически и вычислительно более простых критериев, которые эквивалентны по решению лишь при весьма серьезных допущениях, как о структуре передаваемых сигналов, так и модели канала связи. Именно поэтому в данной статье сделана попытка формально рассмотреть наиболее часто употребляемые информационные критерии синтеза и их взаимосвязь, а также обосновать необходимость использования критериев, непосредственно учитывающих неопределенность о передаваемых сообщениях, а не их более простых аналогов.

**2. Общий подход к синтезу оптимальных функциональных узлов дискретного канала связи по информационным критериям.** Количественной мерой эффекта от принятия того или иного решения является функция потерь  $g(\mathbf{x}', \mathbf{x})$ , причем совершенно естественно, что ее минимальное значение приводит к наиболее благоприятным последствиям. В случае дискретного канала связи данную функцию целесообразно трактовать как количественную меру эффекта от выбора заданного правила кодирования (оператора модуляции  $\Phi$ ) и решения (оператора демодуляции  $\Phi'$ ) одновременно [3]. При этом модель подобного канала аналитически задается в виде следующих преобразований:

$$\mathbf{x} \xrightarrow{\Phi} x(t, \mathbf{r}) \xrightarrow{H} x'(t', \mathbf{r}') \xrightarrow{\Phi'} \mathbf{x}' ,$$

где  $\mathbf{x}$  – многомерный сигнал на входе дискретного канала связи;  $x(t, \mathbf{r})$  – пространственно-временной сигнал на входе непрерывного канала связи;  $x'(t', \mathbf{r}')$  – пространственно-временной сигнал на выходе непрерывного канала связи;  $\mathbf{x}'$  – многомерный сигнал на выходе дискретного канала связи (по сути выносимые решения);  $\Phi$  – оператор

модуляции;  $H$  – оператор непрерывного канала связи;  $\Phi'$  – оператор демодуляции;  $t, t', \mathbf{r}, \mathbf{r}'$  – временные и пространственные координаты на входе и выходе непрерывного канала связи соответственно.

Данная характеристика, по сути, представляет собой априорную оценку последствий принятия тех или иных решений  $\mathbf{x}'$  и формирования реализаций передаваемого сигнала  $x(t, \mathbf{r})$  при наблюдении принимаемого сигнала  $x'(t', \mathbf{r}')$  при условии, что непосредственный доступ к слежению за формируемыми источником сообщениями  $\mathbf{x}$  отсутствует. В то же время необходимо подчеркнуть, что в общем случае, пусть и косвенно, функция потерь  $g(\mathbf{x}', \mathbf{x})$  может зависеть и от передаваемого  $x(t, \mathbf{r})$  и принимаемого  $x'(t', \mathbf{r}')$  сигналов, поскольку существуют задачи, для которых принципиально важным моментом оказывается то, какая именно из возможных реализаций была идентифицирована, а следовательно для различных исходов эффекты от принятия решений являются различными.

Таким образом, можно условно разделить используемые функции потерь на две группы – зависящие и независящие от передаваемого  $x(t, \mathbf{r})$  и принимаемого  $x'(t', \mathbf{r}')$  сигналов. Во втором случае некоторая ограниченность общей постановки задачи приводит к возможности получения аналитических результатов для правил оценки, однако первый позволяет более точно задать исходные данные, а следовательно синтезировать систему, более полно соответствующую условиям своего функционирования.

В качестве наиболее часто употребляемых функций потерь можно отметить квадратическую, абсолютную и равномерную, которые не зависят от передаваемых и принимаемых сигналов. Так, в случае использования пространств со счетным числом измерений они могут быть представлены в соответствующем виде:

$$g_q(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = (\mathbf{x}' - \mathbf{x})^T (\mathbf{x}' - \mathbf{x}), \quad (1)$$

$$g_a(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = \sum |\mathbf{x}' - \mathbf{x}|, \quad (2)$$

$$g_u(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \sum |\mathbf{x}' - \mathbf{x}| \leq \Delta, \\ 1, & \sum |\mathbf{x}' - \mathbf{x}| > \Delta, \end{cases} \quad (3)$$

где  $^T$  – оператор транспонирования;  $\Delta$  – некоторый порог.

В данных формулах предполагается, что суммирование выполняется по всему счетному числу измерений  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{x}'$ .

В ситуации, когда природа исследуемых пространств характеризуется несчетным числом измерений, формулы для простых функций потерь должны быть изменены в соответствии с требованиями, накладываемыми свойствами существа используемых данных. Однако данное предположение не меняет коренным образом общую постановку задачи и при необходимости может быть уточнено.

В то же время необходимо отметить, что использование функций потерь, независимых от передаваемого  $x(t, \mathbf{r})$  и принимаемого  $x'(t', \mathbf{r}')$  сигналов, в качестве меры эффекта выбора заданного правила кодирования и решения для дискретного канала связи систем передачи информации оказывается не совсем корректным. Причина этого кроется в назначении подобных систем, сводящаяся к необходимости доставки к получателю не просто достоверной, но и своевременной информации. То есть при принятии решения важна не просто раздельная оптимальность степени точности воспроизводимых сообщений и их количества, а некоторый интегральный показатель, характеризующий процесс передачи. Так, если принятие решения осуществляется в соответствии с правилом, гарантирующим минимальную в некотором смысле погрешность воспроизведения переданных данных, то, поскольку решения оказываются все же неточны вследствие стохастической природы передаваемых сигналов и помех, для достоверности после принятия решения необходима дополнительная информация, позволяющая точно указать, насколько принятая информация искажена. Таким образом, необходимо затратить дополнительный ресурс, например временной, для передачи этой информации, причем гарантировать, что требуемый ресурс окажется минимальным, невозможно, поскольку вынесение решения базируется на принципе минимальных искажений. Следовательно, может оказаться, что требование к своевременности передачи не выполняется. С другой стороны уменьшение объема передаваемых данных с целью повышения достоверности является не всегда возможной альтернативой, поскольку при этом также может не выполняться требование к своевременности доставки сообщений. В результате принятие решения должно приводить не просто к похожести в некотором смысле переданной информации и воспроизведенной, а к сведению к минимуму неопределенности (недостоверности) о сообщении источника  $\mathbf{x}$ . Именно подобная мера эффекта принятия решений является наиболее целесообразной, поскольку позволяет

учесть как своевременность, так и достоверность передаваемого сообщения в целом.

Согласно [6] неопределенность о некоторых параметрах источника  $\mathbf{x}$  при вынесении решения  $\mathbf{x}'$  трактуется как условная собственная информация, содержащаяся в конкретном событии  $\mathbf{x}$  при условии принятия некоторого  $\mathbf{x}'$ . Следовательно, функция потерь имеет вид:

$$g_i(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = -\log_2 \omega_{\mathbf{x}/\mathbf{x}'}(\mathbf{x}, \mathbf{x}'), \quad (4)$$

где  $\omega_{\mathbf{x}/\mathbf{x}'}(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  – апостериорная плотность вероятности параметров источника  $\mathbf{x}$  после принятия решения  $\mathbf{x}'$ , вычисляемая согласно формуле Байеса:

$$\omega_{\mathbf{x}/\mathbf{x}'} = \frac{\omega_{\mathbf{x}'/\mathbf{x}} \omega_{\mathbf{x}}}{\omega_{\mathbf{x}'}}. \quad (5)$$

Таким образом, она определяется не только передаваемым параметром источника  $\mathbf{x}$  и вынесенным решением  $\mathbf{x}'$ , но и правилами кодирования  $\omega_{\mathbf{x}'/\mathbf{x}}$  и принятия решения  $\omega_{\mathbf{x}'/\mathbf{x}'}$ , а, следовательно, пусть и косвенно, зависит от передаваемого  $x(t, \mathbf{r})$  и принимаемого  $x'(t', \mathbf{r}')$  сигналов [4, 5, 11].

Поскольку дискретный канал связи характеризуется стохастической природой, очевидно, что показатель качества, согласно которому оценивается сама система, должен использовать весь набор исходных статистических данных и в то же время обладать устойчивостью в смысле постоянства для ряда реализаций. Именно поэтому в качестве подобного показателя целесообразно использовать некоторые оценки последствий от принятия решений. Такими оценками являются математические ожидания функции потерь, характеризующие потери от принятия решений в среднем, или байесовский риск:

$$R(\omega_{\mathbf{x}'/\mathbf{x}}) = M \{g(\mathbf{x}', \mathbf{x})\} = \int \int_{\mathbf{x} \mathbf{x}'} g(\mathbf{x}', \mathbf{x}) \omega_{\mathbf{x}'/\mathbf{x}}(\mathbf{x}', \mathbf{x}) \omega_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} d\mathbf{x}'. \quad (6)$$

Следовательно, при использовании в качестве функции потерь неопределенности (4) риск (6) преобразуется в среднюю потерю ин-

формации [8], или средней неопределенность о параметрах источника после наблюдения [6, 12]:

$$H_{x/x'}(\omega_{x'/x}) = - \int \int_{x x'} \log_2 \{ \omega_{x'/x}(x, x') \} \omega_{x'/x}(x', x) \omega_x(x) dx dx' . \quad (7)$$

Таким образом, при синтезе оптимальных систем передачи информации целесообразно использовать в качестве критерия критерий минимума средней потери информации, а оптимум отыскивать на всем множестве условных плотностей вероятности решений при заданных параметрах источника  $\omega_{x'/x}$ , то есть задача синтеза без учета ограничений имеет вид:

$$H_{x/x'}(\omega_{x'/x}) \rightarrow \min_{\omega_{x'/x}} . \quad (8)$$

Необходимо отметить, что данный критерий эквивалентен по решению критерию максимума действительного количества передаваемой информации, или взаимной информации:

$$I_{x',x} = H_x - H_{x/x'} , \quad (9)$$

поскольку энтропия источника  $H_x$  не зависит от функции правдоподобия  $\omega_{x'/x}$ .

Кроме того, если учесть фиксированность длительности интервала наблюдения  $T$ , эти критерии также эквиваленты по решению критерию максимума передаваемой информации [9]:

$$I'_{x',x} = I_{x',x} / T .$$

В литературе [7] также описан так называемый информационный критерий, соответствующий максимуму отношения принятой информации  $I_{x',x}$  относительно переданной  $H_x$  :

$$\delta_I = I_{x',x} / H_x , \quad (10)$$

который также эквивалентен по решению критерию минимума средней потери информации (8) на тех же основаниях, что и в выводах, касающихся выражения (9). Следует отметить главное достоинство

представления показателя качества в виде (10): его относительность (безразмерность) позволяет сравнивать разнородные системы передачи информации при решении задач анализа.

**3. Анализ несогласованности критериев синтеза оптимальных систем передачи информации.** Несмотря на утверждение [7] об отсутствии различий в получаемых решениях при использовании простых функций потерь (1)–(3) для многих задач, число последних является не таким уж значительным. Так, в [8, 14] доказана эквивалентность подобных критериев лишь в условиях существенных ограничений постановки задачи стохастического приема на структуру используемых преобразований, а также статистических характеристик помех, причем лишь для нерандомизированных правил принятия решений:

$$\omega_{x'/x}(\mathbf{x}', x') = \delta[\mathbf{x}' - f_d(x')],$$

где  $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака [1] (в общем случае многомерная);  $f_d(x')$  – детерминированная функция принятия решений.

Для задач бинарного обнаружения и фильтрации значимым оказывается свойство транслятивности функции принятия решений, то есть при некотором сдвиге  $x''$  наблюдаемых данных  $x'$  принятое решение эквивалентно исходному (при наблюдении  $x'$ ) принятому решению, смещенному на величину  $x''$ :

$$f_d(x' + x'') = f_d(x') + x''.$$

В результате, критерии синтеза систем передачи при простых функциях потерь и неопределенности (4) эквивалентны по решению при соблюдении трех ограничений [2, 14]: аддитивности передаваемой информации и помех; равномерности априорного распределения источника  $\omega_x$  и симметричности функции правдоподобия дискретно-непрерывного канала  $\omega_{x'/x}$  относительно оценки максимального правдоподобия.

В качестве примера рассмотрим несогласованность байесовских критериев с простыми функциями потерь и неопределенности для задачи бинарного обнаружения противоположных сигналов в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом. Поскольку подобная задача предполагает наличие только двух гипотез единичной размер-

ностью, то есть  $\mathbf{x} = x$  (передавался сигнал  $a_0 = -1$  с вероятностью  $p_0$  либо противоположный ему сигнал  $a_1 = 1$  с вероятностью  $p_1$ ), то априорное распределение источника имеет дискретный вид:

$$\omega_{\mathbf{x}}(x) = \sum_{i=0}^1 p_i \delta(x - a_i). \quad (11)$$

Функция правдоподобия дискретного канала связи, формируемого на основе непрерывного с аддитивным белым гауссовским шумом, имеющим нулевое математическое ожидание и конечную дисперсию  $\sigma^2$ , определяется порогом обнаружения  $d$ :

$$\omega_{\mathbf{x}/\mathbf{x}}(x', x) = \frac{1}{2} \left[ \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d-x}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \delta(x' - a_1) + \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{d-x}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \delta(x' - a_0) \right], \quad (12)$$

где  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz$  – функция ошибок, а, следовательно, интегральные функции гауссовского распределения определяются выражениями

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^d e^{-\frac{(z-x)^2}{2\sigma^2}} dz = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{d-x}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad \text{и}$$

$$\int_d^{\infty} e^{-\frac{(z-x)^2}{2\sigma^2}} dz = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{d-x}{\sqrt{2}\sigma} \right).$$

Тогда согласно формуле полной вероятности плотность распределения сигнала на выходе дискретного канала связи имеет вид:

$$\omega_{\mathbf{x}}(x') = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^1 p_i \left[ \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d-a_i}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \delta(x' - a_1) + \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{d-a_i}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \delta(x' - a_0) \right]. \quad (13)$$

Простая функция потерь (3) при условии  $\Delta \rightarrow 0$  принимает форму дельта-функции:

$$g(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = g_u(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = 1 - \delta(\mathbf{x}' - \mathbf{x}). \quad (14)$$

В результате подстановка полученных выражений (11), (12) и (14) в (6), а также использование фильтрующего свойства дельта-функции приводит к следующей формуле для среднего риска, в данном случае являющегося средней вероятностью ошибки, соответствующему байесовскому критерию с простой функцией потерь:

$$R = p_o = \frac{1}{2} \left[ 1 + p_1 \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_1}{\sqrt{2\sigma}} \right) - p_o \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_0}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right]. \quad (15)$$

Средняя потеря информации также зависит от порога обнаружения и на основании (5), (7), (11), (12) и (13) задается выражением:

$$H_{x/x'} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^1 p_i \left[ \log_2 \left\{ \frac{p_i \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\}}{1 - \sum_{j=0}^1 p_j \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_j}{\sqrt{2\sigma}} \right)} \right\} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\} + \right. \\ \left. + \log_2 \left[ \frac{p_i \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\}}{1 + \sum_{j=0}^1 p_j \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_j}{\sqrt{2\sigma}} \right)} \right] \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\} \right]. \quad (16)$$

Энтропия источника согласно (11) имеет вид:

$$H_x = - \sum_{i=0}^1 p_i \log p_i. \quad (17)$$

В результате подстановка (16) и (17) в (10) приводит к следующей форме отношения принятой информации относительно переданной  $\delta_i$ , соответствующего байесовскому критерию с функцией неопределенности:

$$\delta_i = \frac{1}{2 \sum_{k=0}^1 p_k \log_2 p_k} \sum_{i=0}^1 p_i \left[ \log_2 \left\{ \frac{p_i \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\}}{1 - \sum_{j=0}^1 p_j \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_j}{\sqrt{2\sigma}} \right)} \right\} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\} + \right.$$

$$+ \log_2 \left[ \frac{p_i \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_i}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\}}{1 + \sum_{j=0}^1 p_j \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_j}{\sqrt{2}\sigma} \right)} \right] \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{d - a_i}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} + 1. \quad (18)$$

На основании полученных выражений (15) и (18) рассчитаны графики зависимостей средней вероятности ошибки  $p_o$  и отношения принятой информации относительно переданной  $\delta_I$  от порога обнаружения  $d$  при отношении сигнал-помеха равном 8 ( $P_s/P_n = 8$ , где  $P_s = \sum_{i=0}^1 a_i^2 p_i = 1$  и  $P_n = \sigma^2$ ) и априорной вероятности передачи единицы  $p_1 = 10^{-5}$ , приведенные на рисунке 1. На данном рисунке для удобства восприятия используется две оси ординат (левая –  $\delta_I$ , правая –  $p_o$ ), а принадлежность каждой из осей к определенным кривым указано в виде соответствующих обозначений на графиках.

Данные зависимости подтверждают наличие различных экстремальных свойств рассматриваемых байесовских критериев, поскольку минимуму вероятности ошибки  $\min p_o$  соответствует не максимальное значение относительной взаимной информации  $\max \delta_I$ , причем разница  $\Delta\{\delta_I\} = \max \delta_I - \delta_I(\max p_o)$  может достигать значительных величин (нескольких процентов).

Более наглядно этот результат представлен на рисунке 2, отражающем немонотонность показателей средней вероятности ошибки и относительной взаимной информации при тех же, что и для рисунка 1, исходных данных. Можно выделить три характерные области вариаций этих показателей. В первой (I:  $\delta_I < \delta_I[\min p_o]$ ) изменение порога обнаружения  $d$  приводит к снижению вероятности ошибки  $p_o$  до минимального значения  $\min p_o$  и одновременно росту относительной взаимной информации  $\delta_I$ . Во второй (II:  $\delta_I > \delta_I[\min p_o]$  и  $p_o < p_o[\max \delta_I]$ ) – порогом квантования возможно лишь повысить среднюю вероятность ошибки  $p_o$ , правда увеличивая и относительную взаимную информацию  $\delta_I$  до максимального значения  $\max \delta_I$ . В третьей же (III:  $p_o > p_o[\max \delta_I]$ ) – одновременно ухудшаются оба показателя.

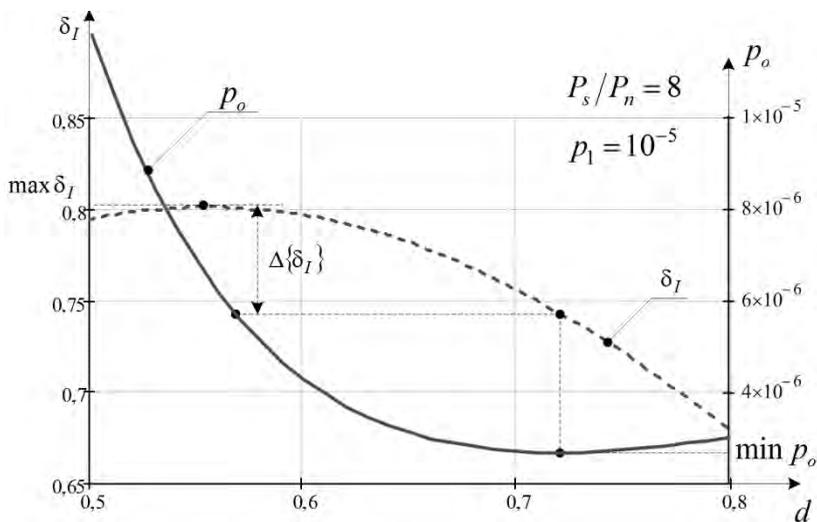


Рис. 1. Зависимости средней вероятности ошибки  $p_o$  и отношения принятой информации относительно переданной  $\delta_I$  от порога обнаружения  $d$

Следует отметить, что абсолютная разница  $\Delta\{\delta_I\}$  между относительной взаимной информацией при минимальной вероятности ошибки и максимальной величиной относительной взаимной информации существенно зависит от соотношения между сигналом и помехой, а также информационной емкости источника (вероятностных характеристик). Данное свойство иллюстрируется на рисунке 3, на котором для различных отношений сигнал-помеха  $P_s/P_n$  построены графики зависимостей отношения принятой информации относительно переданной  $\delta_I$  от средней вероятности ошибки  $p_o$  при оптимальном пороге обнаружения  $d$  в обоих случаях (кривые  $\max \delta_I$  и  $\delta_I[\min p_o]$  для канала без стирания соответственно). Варьируемым параметром при этом выступает вероятность появления нуля или единицы, что, в конечном итоге, приводит к изменению энтропии источника.

Таким образом, можно заключить, что для бинарной задачи обнаружения поиск решающих правил по критерию минимума потерь информации существенно отличается от поиска по критерию минимума средней вероятности ошибки при сравнительно небольших отношениях сигнал-помеха и информационной емкости источника (сильного отличия от равновероятного источника).

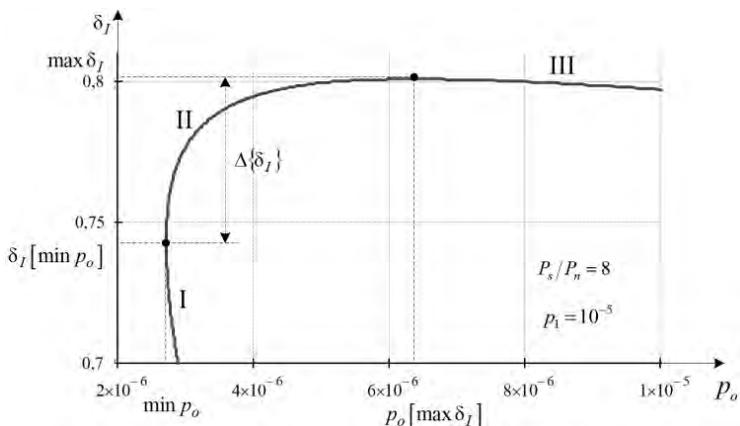


Рис. 2. Зависимость отношения принятой информации относительно переданной  $\delta_I$  от средней вероятности ошибки  $p_o$

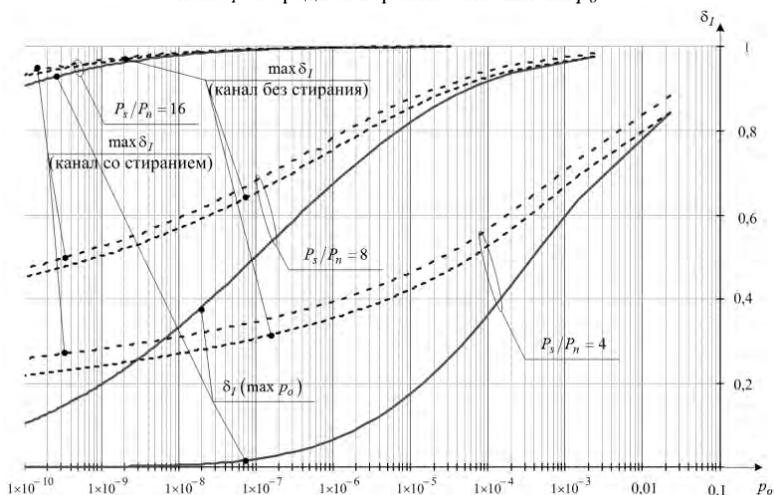


Рис. 3. Зависимость отношения принятой информации относительно переданной  $\delta_I$  от средней вероятности ошибки  $p_o$  при оптимальном пороге обнаружения или области стирания

Другим примером целесообразности применения критерия минимума потери информации при синтезе систем передачи является оптимизация канала со стиранием. По сути это некоторая модификация стандартной задачи бинарного обнаружения за тем исключением, что выходной алфавит канала уже состоит не из двух символов, а

трех – добавлен стирающий символ  $a_2 = 0$  (всегда ошибка). Таким образом, распределение источника идентично (11), однако функция правдоподобия дискретного канала связи отлична от (12) и определяется границей  $d'$  области стирания, задаваемой отрезком  $[-d'; d']$  (в исследуемом случае симметричная относительно начала координат):

$$\omega_{x'/x}(x', x) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left( \frac{d'-x}{\sqrt{2\sigma}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{d'+x}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\} \delta(x'-a_2) + \frac{1}{2} \left[ \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'-x}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\} \delta(x'-a_1) + \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'+x}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\} \delta(x'-a_0) \right]. \quad (19)$$

Тогда согласно формуле полной вероятности плотность распределения сигнала на выходе дискретного канала связи имеет вид:

$$\omega_{x'}(x') = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^1 p_i \left[ \left\{ \operatorname{erf} \left( \frac{d'-a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{d'+a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\} \delta(x'-a_2) + \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'-a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\} \delta(x'-a_1) + \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'+a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\} \delta(x'-a_0) \right]. \quad (20)$$

Подстановка полученных выражений (11), (14) и (19) в (6), а также использование фильтрующего свойства дельта-функции приводит к следующей формуле для среднего риска (средней вероятности ошибки):

$$R = p_o = \frac{1}{2} \left[ 1 + p_1 \operatorname{erf} \left( \frac{d'-a_1}{\sqrt{2\sigma}} \right) + p_0 \operatorname{erf} \left( \frac{d'+a_0}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right]. \quad (21)$$

Средняя потеря информации также зависит от границы области стирания  $d'$  и на основании (5), (7), (11), (20) и (21) задается выражением:

$$H_{x'/x} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^1 p_i \left[ \log_2 \left\{ \frac{p_i \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'-a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\}}{1 - \sum_{j=0}^1 p_j \operatorname{erf} \left( \frac{d'-a_j}{\sqrt{2\sigma}} \right)} \right\} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'-a_i}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right\} + \right.$$

$$+ \log_2 \left[ \frac{p_i \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'+a_i}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\}}{1 - \sum_{j=0}^1 p_j \operatorname{erf} \left( \frac{d'+a_j}{\sqrt{2}\sigma} \right)} \right] \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'+a_i}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\}. \quad (22)$$

Энтропия источника в данном случае неизменна и аналогична (17).

В результате подстановка (21) и (22) в (10) приводит к следующей форме отношения принятой информации относительно переданной  $\delta_i$ , соответствующего байесовскому критерию с функцией неопределенности:

$$\delta_i = \frac{1}{2 \sum_{k=0}^1 p_k \log_2 p_k} \sum_{i=0}^1 p_i \left[ \log_2 \left[ \frac{p_i \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'-a_i}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\}}{1 - \sum_{j=0}^1 p_j \operatorname{erf} \left( \frac{d'-a_j}{\sqrt{2}\sigma} \right)} \right] \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'-a_i}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} + \right. \\ \left. + \log_2 \left[ \frac{p_i \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'+a_i}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\}}{1 - \sum_{j=0}^1 p_j \operatorname{erf} \left( \frac{d'+a_j}{\sqrt{2}\sigma} \right)} \right] \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d'+a_i}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} + 1 \right].$$

Для подобной системы при  $P_s/P_n = 8$  и априорной вероятности передачи единицы  $p_1 = 0,5$  графики зависимостей средней вероятности ошибки  $p_o$  и отношения принятой информации относительно переданной  $\delta_i$  от границы области стирания  $d'$  приведены на рисунке 4. На данном рисунке для удобства восприятия используется две оси ординат (левая –  $\delta_i$ , правая –  $p_o$ ), а принадлежность каждой из осей к определенным кривым указано в виде соответствующих обозначений на графиках. Он иллюстрирует монотонный рост вероятности ошибки  $p_o$  при увеличении области стирания, а следовательно согласно данному критерию введение дополнительного символа оказывает лишь негативные последствия. В то же время относительная взаимная инфор-

магия имеет ярко выраженный экстремум  $\max \delta_I$ , что свидетельствует о разумности использования дополнительного символа.

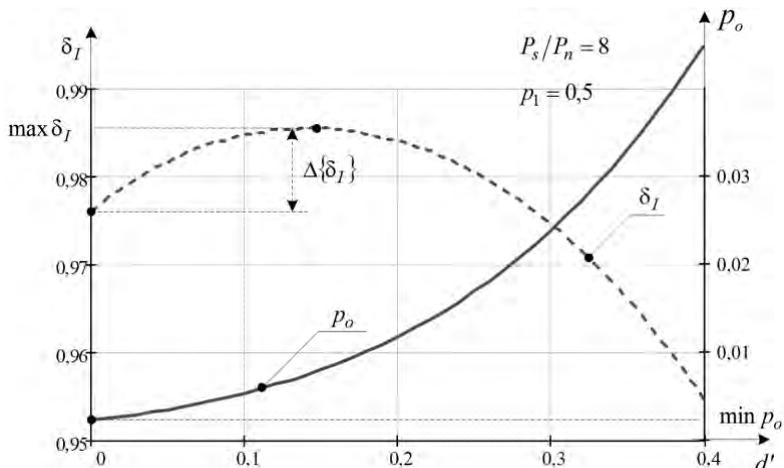


Рис. 4. Зависимости средней вероятности ошибки  $p_o$  и отношения принятой информации относительно переданной  $\delta_I$  от границы области стирания  $d'$

Более наглядно данный результат представлен на рисунке 5, отражающем немонотонность показателей средней вероятности ошибки и относительной взаимной информации при тех же, что и для рисунка 4, исходных данных. Здесь присутствуют две характерные области. В первой (I:  $p_o < p_o[\max \delta_I]$ ) увеличение области стирания приводит к росту относительной взаимной информации, а во второй (II:  $p_o > p_o[\max \delta_I]$ ) область стирания увеличивается настолько, что приводит к снижению относительной информации. Объяснение этим результатам можно дать такое. Введение дополнительного символа позволяет приемнику с полной уверенностью идентифицировать недостоверные сообщения, что позволяет избавляться от некачественной информации. Критерий средней вероятности ошибки не способен правильно реагировать на ошибочные данные в канале стирания, поскольку для него появление этого символа оказывается всегда ошибочным, а следовательно увеличивает число ошибок. Критерий же минимума потери информации воспринимает символ стирания как идентификатор недостоверности переданного сообщения, а значит, позволяет устранить ошибочную информацию, что влечет снижение ее

потерь. Таким образом, увеличение области стирания приводит к увеличению доли идентифицируемых как ошибка сообщений, а следовательно пока эта доля не достигает предела насыщения, соответствующему моменту, когда в среднем ошибок оказывается примерно столько же сколько и выпадающих символов стирания, относительная информация растет (область I). По мере дальнейшего возрастания объема области стирания относительная информация начинает убывать, так как в среднем количество ошибочных сообщений становится меньше числа выпадающих символов стирания (область II).

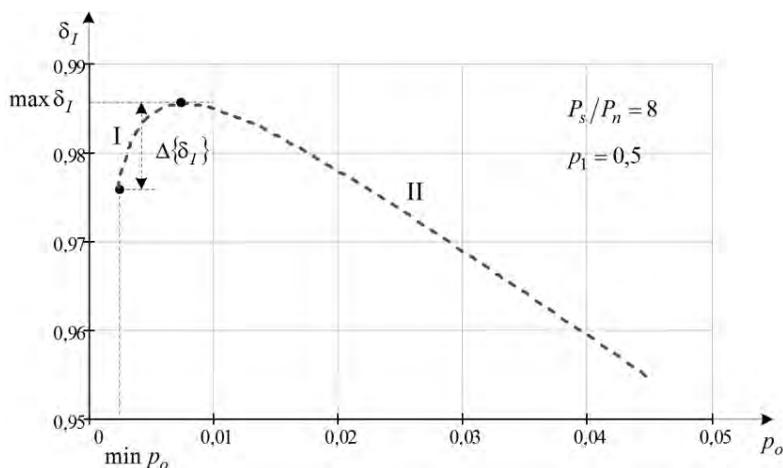


Рис. 5. Зависимость отношения принятой информации относительно переданной  $\delta_I$  от средней вероятности ошибки  $p_o$

Следует отметить, что абсолютная величина погрешности  $\Delta\{\delta_I\}$  между относительной взаимной информацией при минимальной вероятности ошибки и максимальной величиной относительной взаимной информации так же, как и в предыдущем случае, определяется величиной сигнала и помехи, а также энтропией источника. Как демонстрирует рисунок 3 (кривые  $\max \delta_I$  и  $\delta_I[\min p_o]$  для канала со стиранием соответственно), увеличение отношения сигнал-помеха, а также производительности источника приводят к снижению различия между системами приема, синтезированными по критерию максимума средней вероятности ошибки и минимума потерь информации. Кроме того, рисунок 5 подтверждает преимущества канала со стиранием по сравнению с каналом с бинарным выходом, что является следствием воз-

возможности получения дополнительной достоверной информации об ошибочном сообщении в случае попадания принимаемых данных в область стирания.

**4. Заключение.** Таким образом, в работе представлены наиболее часто используемые информационные критерии синтеза функциональных узлов систем передачи информации, являющиеся частными случаями критерия минимального среднего риска при определенных функциях потерь. Тем не менее, исследование задач бинарного обнаружения и оптимизации канала связи со стиранием показало наличие существенных отличий в структуре и параметрах синтезируемых систем передачи информации по байесовским критериям при использовании простых функций потерь и неопределенности.

### Литература

1. *Баскаков С. И.* Радиотехнические цепи и сигналы: учебник // М.: Высш. Школа, 1983. 536 с.
2. *Батенков А. А., Батенков К. А.* Дискретизация линейного канала связи с памятью и аддитивным белым гауссовским шумом численным методом // Математическое моделирование. 2009. Т. 21, № 1. С. 53–74.
3. *Батенков К. А.* Математические модели модулятора и демодулятора с заданным порядком нелинейности // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 1. С. 14–21.
4. *Батенков К. А.* Математическое моделирование непрерывных многопараметрических каналов связи в операторной форме // Телекоммуникации. 2013. № 10. С. 2–4.
5. *Батенков К. А.* Модели системных характеристик линейных каналов связи на основе интегральных преобразований // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2012. № 3(4). С. 120–125.
6. *Галлагер Р.* Теория информации и надежная связь: пер. с англ. // под ред. М. С. Пинскера и Б. С. Цыбакова. М.: Советское радио, 1974. 720 с.
7. *Игнатов В. А.* Теория информации и передачи сигналов: учебник для вузов // М.: Радио и связь, 1991. 280 с.
8. *Миддлтон Д., Ван-Метер Д.* Обнаружение и воспроизведение сигналов, принятых на фоне шумов, с точки зрения теории статистических решений // Прием импульсных сигналов при наличии шума / под. ред. А. Е. Башаринова и М. С. Александрова. М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960. С. 251–373.
9. *Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Коржик В. И., Назаров М. В.* Теория электрической связи: учеб. для вузов // под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.
10. *Васильев К. К., Глушков В. А., Дормидонтов А. В., Нестеренко А. Г.* Теория электрической связи: учебное пособие // под общ. ред. К. К. Васильева. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 452 с.
11. *Хворостенко Н. П.* Статистическая теория демодуляции дискретных сигналов // М.: Издательство Связь, 1968. 336 с.
12. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике: пер. с англ // под. ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова. М.: Ин. лит., 1963. 830 с.
13. *Krouk E., Semenov. S.* Modulation and coding techniques in wireless communications // Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 662 p.
14. *Middleton D.* An Introduction to Statistical Communication Theory // N. Y.: McGraw-Hill Book Co, 1960. 1184 p.

## References

1. Baskakov S. I. *Radiotekhnicheskie cepti i signaly: uchebnik* [Radiotechnical circuits and signals: text-book]. Moscow: Vyssh. Shkola, 1983. 536 p. (In Russ.).
2. Batenkov A. A., Batenkov K. A. [Discretization of linear channel with memory and additive Gaussian noise by numerical method]. *Matematicheskoe modelirovanie – Mathematical modelling*. 2009. vol. 21, no 1. pp. 53–74. (In Russ.).
3. Batenkov K. A. [Mathematical models of modulator and demodulator with prescribed order of nonlinearity]. *Tsifrovaya obrabotka signalov – Digital signal processing*. 2013. no 1. pp. 14–21. (In Russ.).
4. Batenkov K. A. [Mathematical modelling of continuous multiparametric channels in operator]. *Telekommunikatsii – Telecommunication*. 2013. no 10. pp. 2–4. (In Russ.).
5. Batenkov K. A. [System characteristic models of linear channels on base of integral transformations] *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tehnike, prirode i obschestve – Models, systems, nets in economics, technique, nature and science*. 2012. no. 3(4). pp. 120–125. (In Russ.).
6. Gallager R. G. [Information theory and reliable communications] 1968. 608 p. (Russ. ed.: Pinsker M. S. and Cybakov B. S. *Teoriya informacii i nadezhnaya svyaz* Moscow: Sovetskoe radio, 1974. 720 p. (In Russ.)).
7. Ignatov V. A. *Teoriya informacii i peredachi signalov : uchebnik dlja vuzov* [Theory of Information and signal transmission]. Moscow: Radio i svyaz', 1991. 280 p. (In Russ.).
8. Middleton D., Van Meter D. [Signal detection and reproduction sensed against the background noises in terms of statistical decision theory]. *Priem impul'snyh signalov pri nalichii shuma – Pulse signal receipt under noise*. edited by. Basharinov A. E., Aleksandrov M. S. Moscow; Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1960. pp. 251–373. (In Russ.).
9. Zuko A. G., Klovskii D. D., Korzhik V. I., Nazarov M. V. *Teoriya jelektricheskoy svyazi: ucheb. dlja vuzov* [Communication theory: text-book for higher schools]. edited by Klovskii D. D. Moscow: Radio i svyaz', 1999. 432 p. (In Russ.).
10. Vasil'ev K. K., Glushkov V. A., Dormidontov A. V., Nesterenko A. G. *Teoriya jelektricheskoy svyazi: uchebnoe posobie* [Communication theory: tutorial for higher schools]. edited by Vasil'ev K. K.. Ulyanovsk: UIGTU, 2008. 452 p. (In Russ.).
11. Khvorostenko N. P. *Statisticheskaja teoriya demoduljacii diskretnyh signalov* [Statistical theory of discrete signal demodulation]. Moscow: Izdatel'stvo svyaz', 1968. 336 p. (In Russ.).
12. Shannon C. [The Mathematical Theory of Communication]. University of Illinois Press. 1949. 144 p. (Russ. ed.: Dobrushin R. L., Lupanov O. B. *Raboty po teorii informacii i kibernetike* Moscow : In. lit., 1963. 830 p. (In Russ.)).
13. Krouk E., Semenov S. *Modulation and coding techniques in wireless communications*: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 662 p.
14. Middleton D. *An Introduction to Statistical Communication Theory*. N. Y.: McGraw-Hill Book Co, 1960. 1184 p.

**Батенков Кирилл Александрович** – к-т техн. наук, докторант Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: статистическая теория связи, модели и методы обработки сигналов. Число научных публикаций – 85. [pustur@yandex.ru](mailto:pustur@yandex.ru); Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, ул. Приборостроительная, д. 35, Орёл, 302034, РФ.

**Batenkov Kirill Aleksandrovich** – Ph.D., doctoral candidate of Academy of Federal Guard Service. Research interests: statistical communication theory, models and methods of signal processing. The number of scientific publications – 85. [pustur@yandex.ru](mailto:pustur@yandex.ru); Academy of Federal Guard Service, Priborostroitel'naya str., 35, Orel, 302034, Russian Federation.

## РЕФЕРАТ

### *Батенков К.А.* Проблема синтеза функциональных узлов дискретного канала связи по информационным критериям.

В работе рассмотрена постановка задачи синтеза систем передачи информации по байесовским критериям при различных функциях потерь. Представлены наиболее часто используемые информационные критерии синтеза функциональных узлов систем передачи информации, являющиеся частными случаями критерия минимального среднего риска при определенных функциях потерь, таких как простая, квадратическая, абсолютная и функция неопределенности.

Отмечено, что принятие решения должно приводить не просто к похожести в некотором смысле переданной информации и воспроизведенной, а к сведению к минимуму неопределенности (недоверности) о сообщении источника. Именно подобная мера эффекта принятия решений является наиболее целесообразной, поскольку позволяет учесть как своевременность, так и достоверность передаваемого сообщения в целом.

Анализ доступной литературы показал, что критерии синтеза систем передачи при простых функциях потерь и неопределенности эквивалентны по решению при соблюдении трех ограничений: аддитивности передаваемой информации и помех; равномерности априорного распределения источника и симметричности функции правдоподобия дискретно-непрерывного канала относительно оценки максимального правдоподобия.

Установлено, что для достаточно общих условий существуют значительные отличия в структуре и параметрах синтезируемых систем передачи информации по байесовским критериям при использовании простых функций потерь и функции неопределенности.

## SUMMARY

### *Batenkov K.A.* Discrete channel functional part synthesis problem under information criterions.

Communication system synthesis task statement under Bayesian criterions with variant loss functions is considered. Most high-usage information syntheses criterions of communication system functional parts being special case of minimal average risk criterion under defined loss functions like simple, quadratic, absolute and uncertainty function.

It is remarked that decision making must not lead to similarity in a manner of transmitted and reproduced information but must minimize uncertainty about source message. Just similar measure of decision making effectiveness is most reasonable because it let to allow both timeliness and reliability of transmitted messages integrally.

Available publication analysis shown that communication system syntheses criterions under simple loss and uncertainty functions are decision equivalence under observance three restrictions: transmitted information and disturbance additivity; prior source distribution uniformity and likelihood function symmetry of discrete-continuous channel relatively maximum likelihood estimate.

Significant differences in communication system structure and parameters synthesized under Bayesian criterions with simple loss function and uncertainty function are obtained at sufficiently general conditions.

Б.А. НОВИКОВ, И.В. СУДОС  
**ИНДЕКСИРОВАНИЕ ДАННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ БОЛЬШОЙ  
РАЗМЕРНОСТИ**

---

*Новиков Б.А., Судос И.В. Индексирование данных в пространстве большой размерности.*

**Аннотация.** Индексирование данных является неотделимой частью задачи поиска. В то время как для данных в пространствах размерностей не более 5 существует хорошо изученный набор эффективных алгоритмов индексации и поиска, для пространств большой размерности эти алгоритмы оказываются неэффективны или неприменимы. В этом обзоре мы приводим существующие обоснования проблем связанных с индексированием в пространствах большой размерности для задачи поиска ближайшего соседа. Рассматриваются возможные методы решения обозначенных проблем, применимые в областях анализа данных, таких как кластеризация и извлечение скрытых структур. Ставится вопрос о применимости различных методов размерностной редукции к задаче индексирования и поиска ближайшего соседа.

**Ключевые слова:** индексирование, поиск ближайшего соседа, данные большой размерности, анализ данных, редукция размерности.

*Novikov B.A., Sudos I.V. Indexing of data in high dimensional spaces.*

**Abstract.** Indexing of the data is an essential part of the search problem. Whilst a well studied set of efficient algorithms of indexing and search exist for a data in the spaces of the dimensionality less than 5, these algorithms are inefficient or not applicable for high dimensional spaces. We review existing studies of the problems related to indexing in a high dimensional space for a nearest neighbour search problem. Possible methods of the designated problems solution that are applicable in the areas of data analysis such as clustering and hidden structure elicitation are regarded. The question on the applicability of the various dimensional reduction methods for an indexing and nearest neighbour search problem.

**Keywords:** indexing, nearest neighbour search, high dimensional data, data analysis, dimensionality reduction.

---

**1. Введение.** Под данными большой размерности в информатике как правило понимаются наборы объектов, характеризующиеся большим (более десяти) количеством атрибутов [1].

Рассмотрим задачу поиска в пространствах большой размерности. Задача опирается на многие другие задачи анализа данных в пространстве больших размерностей, в первую очередь: кластеризацию, классификацию и статистический анализ. Решение задачи индексации данных рассматривается как часть задачи построения алгоритма поиска. Задача информационного поиска и индексации в пространствах большой размерности кардинально различается в сложности и основных алгоритмических принципах от задачи информационного поиска в пространствах малой размерности и текстового поиска, подробно описанных в книге [2].

Важно представлять, какие практические задачи используют поиск в пространствах большой размерности, какие ограничения они ставят и с какими теоретическими проблемами сталкиваются.

Каждый рассматриваемый случай применения поиска в пространствах большой размерности может быть рассмотрен со следующих основных позиций:

- свойства данных - элементов пространства поиска (размерность, интенсивность обновления, распределённость).
- вид поискового запроса и требуемая точность поиска.

Мы будем рассматривать в качестве пространства поиска  $d$ -мерное векторное пространство. В качестве данных, среди которых осуществляется поиск - множество векторов  $V$ ,  $|V| = N$  в этом пространстве. Множество  $V$  формируется в результате процесса обработки исходных данных, например, изображений, видео, сигналов, текстов. Процесс называется трансформацией признаков или выборкой признаков (feature transformation, feature selection), схематически он изображен на рисунке 1. Алгоритм трансформации признаков зависит от происхождения и представления изначальных данных. Каждый элемент  $v \in V$  соответствует одному объекту из набора исходных данных, например, одному изображению, сигналу и т.д. Подробнее этот вопрос изучается в работах: [4–6]. В исследовании [16] приведены следующие применяемые на практике запросы: *Запрос-диапазон (range-query)* Такой запрос представляется в виде прямоугольника в некотором подпространстве:  $q = [l_{i_1}, r_{i_1}] \times \dots \times [l_{i_m}, r_{i_m}]$ . Результат такого запроса - все существующие данные, соответствующие координаты которых заключены в  $q$ . *Запрос ближайших соседей* Пусть  $q$  - вектор. Для данного запроса можно выделить 3 подтипа. Первый - нахождение  $N$  ближайших относительно некоторых функций расстояния  $dist(q, x)$  векторов к вектору-запросу  $q$ . Второй подтип - нахождение всех векторов, удаленных не более чем на  $R$  от  $q$ . Третий - нахождение всех ближайших к  $q$  векторов, причем степень близости определяет сам алгоритм поиска. Перейдем к рассмотрению практических примеров.

**Примеры применения поиска в пространствах большой размерности.** *Мультимедиа коллекции.* Распространенный случай применимости поиска в пространствах большой размерности - это поиск по мультимедиа коллекциям. Под мультимедиа коллекциями подразумеваются наборы изображений, видео, звуков. В этом случае процесс трансформации признаков выделит в качестве векторов данных функции распределения цвета, информацию о форме, спектральные характеристики и др. Способы индексирования для подобных систем рассмотрены Бе-

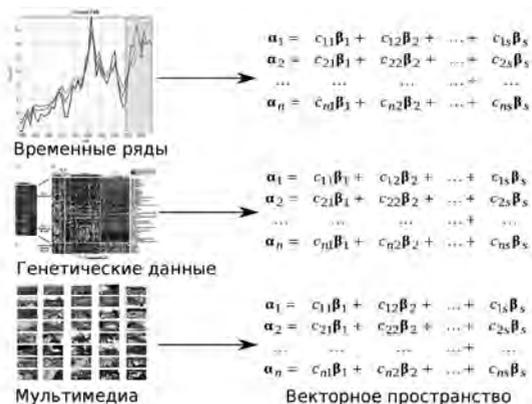


Рис. 1. Преобразование исходных коллекций в вектора

мом и др. в [16]. В этой же работе отмечено одно отличие подобных поисковых систем - разнообразные виды запросов. Наиболее важным считается запрос ближайших соседей, допускающий неточность результата в ряде случаев. Интенсивность обновления может быть весьма высокой, но индексация может осуществляться с определенной задержкой. Релевантность результата запроса поиска может быть оценена с помощью стандартных метрик [2]. Точности:

$$P = \frac{|D_{rel} \cap D_{found}|}{D_{found}},$$

и полноты:

$$R = \frac{|D_{rel} \cap D_{found}|}{D_{rel}},$$

где  $D_{rel}$  - множество релевантных данному запросу векторов в базе, а  $D_{found}$  - множество найденных векторов. Для подобных систем важна скорость поиска и высокая доступность данных. Система хранения часто содержит дисковую память и может быть распределенной на нескольких узлах, соединенных сетью.

*Экспрессия генов.* Множество данных, используемых в биоинформатике часто являются высокоразмерными, достигая тысяч координат. Так называемые микромассивы (microarrays) [3] представляют матрицы данных, каждая строка которой соответствует определенному гену, каждый столбец - условию, при котором замерялась экспрессия гена. В качестве элемента такой матрицы выступает численно выраженный "уровень экспрессии" гена, характеризующий его влияние на

конечный белковый продукт при заданных условиях. Особенность этой задачи в том, что пользователь изначально не может утверждать, какие гены являются “ближайшими соседями”. Задача индексирования здесь идет совместно с задачей выявления шаблонов экспрессии. В [7] рассматривается важность восстановления функциональных или эволюционных связей по одному экземпляру генома. В данном случае требуется поиск ближайших соседей. Как правило, подобные задачи подразумевают статичность данных, допустимы задержки как и при индексации, так и при поиске.

*Сенсорные сети, системы принятия решений.* Интересной задачей по поиску высокоразмерных данных является поиск в сенсорных сетях [8, 9]. Предположим, мы имеем набор распределенных в пространстве датчиков. Датчики работают в реальном времени и собирают высокоразмерную информацию, такую как видео, звуки, показатели температур, напряженность поля и т.д. Как показано в [8, 9], наиболее востребован в этих системах поиск ближайшего соседа. Необходимость вести такой поиск в реальном времени, ограниченная пропускная способность канала, а так же ограниченные вычислительные возможности отдельного узла, с которым связан сенсор, делают задачу поиска весьма трудной. Подобные задачи могут быть востребованы в системах принятия решения. На этапе создания модели среды [10] часто требуется определить ближайших соседей к некоторой точке из входных данных и уточнить вероятностную модель, оценки функции полезности.

Приведенные выше примеры показывают, что в реальных поисковых системах может быть различный набор требований на скорость и точность поиска. Данные могут быть как статическими, так и динамическими с высокой скоростью обновления. Для ряда задач на практике возникают серьезные аппаратные ограничения, такие как пропускная способность сетевого канала, необходимость использовать дисковые устройства. Возможно требование на индексирование данных в реальном времени, чтобы обеспечить высокую скорость поиска сразу же после обновления. Реализация каждого из изложенных требований находит трудности, некоторые из которых относятся к фундаментальным теоретическим проблемам, связанным с анализом данных большой размерности. Наличие этих проблем приводит к отсутствию единой модели и устоявшихся подходов решения задач индексации, примененных, например, в реляционной модели. На данный момент, большинство практических задач используют для хранения данных большой размерности неспециализированные базы данных, например NoSql базы, размещая средства индексации и поиска вне базы данных.

Цель этой работы - рассмотреть все возможные, в том числе наиболее общие проблемы индексации в пространствах большой размерности. Так же здесь будут рассмотрены некоторые существующие решения и поставлены вопросы, требующие дальнейших изысканий.

В первом пункте мы рассматриваем общую теоретическую проблему, связанную с анализом данных в пространствах большой размерности. Далее мы более подробно рассмотрим как эта проблема отражается на индексации и кластеризации и делает более трудными определенные практические задачи, такие как индексация распределённых данных и индексация динамических данных.

**2. Проблемы индексации и поиска в пространствах большой размерности.** Общей и наиболее изученной проблемой для всех приведенных выше задач является проблема именуемая «*Проклятием размерностей*». Впервые данная проблема была сформулирована Р. Беллманом [11] в книге “Динамическое программирование”. Исследуемая проблема имеет различные интерпретации для задач классификации, регрессионного анализа, кластеризации и поиска. При этом можно выделить два общих аспекта: общее увеличение информации, которую нужно обработать при увеличении числа размерностей, и проблема значимости функции расстояния. Первое вызывает трудности, которые при значительном росте количества размерностей приводят к невозможности численно разрешить задачи анализа данных за приемлемое время. Второй аспект может значительно усложнить исследование функций и параметров распределения данных, скрывая их особенности, что в конечном счете приведет к неверной классификации и нерелевантному поиску. Опишем подробнее проблему расстояния. Для этого обратимся к фундаментальной проблеме ближайшего соседа в пространствах больших размерностей. Бейер и др. [12] ставят вопрос о значимости определения ближайшего соседа в пространстве больших размерностей. Они определяют результат нахождения ближайших соседей как нестабильный (относительно параметра  $\epsilon$ ), если расстояние  $dist(q, x)$  от выбранного вектора-запроса  $q$  до большинства векторов в наборе данных не превосходит  $(1 + \epsilon)dist(q, p)$ , где  $p$  - ближайший к  $q$  сосед, а  $\epsilon$  - некоторый (малый) параметр. Бейер и др. выводят условие на распределение данных и распределение вектора-запроса, которое позволяет утверждать, что большинство запросов для данных распределений вернет нестабильный результат поиска ближайших соседей. Условием является следующее:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} \frac{var(dist_d(P_d, Q_d))}{E^2(dist_d(P_d, Q_d))} = 0.$$

Здесь и далее сходимостъ подразумевается в смысле “по вероятности”.  $P$  и  $Q$  - произвольный вектор из набора данных и вектор-запрос соответственно. В работе доказано, что выполнение этого условия влечет нестабильность поиска ближайшего соседа, что формально записывается, как:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} P[\text{dist}_{\max} \leq (1 + \epsilon)\text{dist}_{\min}] = 1.$$

То есть максимальное возможное расстояние от вектора-запроса до произвольного вектора почти не отличается от расстояния до ближайшего соседа. Далее, в [12] показано, что на практике приведенное условие выполняется для Евклидова расстояния и ряда наиболее интересных с точки зрения практического применения функций распределения. Таким образом, классическое определение расстояния влечет неразрешимость проблемы ближайшего соседа, которая напрямую связана с задачами поиска, классификации, кластеризации. Гиннебург, Аггарваль и Кеим [13] дополняют результат [12] рядом утверждений для Евклидовой метрики. Основным результатом [13] можно считать рассмотрение проблемы расстояния при уменьшении количества измерений (проекция в подпространство). Здесь выводится качественный критерий таких проекций с точки зрения эффективности функции расстояния в них. Идея основана на применении [30]. Требуется, чтобы среди векторов данных в некоторой проекции были как и близкие к друг другу (вектора внутри одного кластера) так и удаленные друг от друга (принадлежащие разным кластерам или выбросы). На рисунке 2 показаны графики распределения расстояний между двумя произвольными векторами из наборов данных. На рисунке 2а показано распределение расстояний, при котором набор данных располагает хорошо отделимыми кластерами, а на рисунке 2б такое распределение, что большая часть точек оказывается попарно равноудаленными друг от друга. Вариант показанный справа соответствует большему значению качества выбранной проекции. Для численной записи функции качества здесь применяется ядерная оценка плотности. Заметим, что подобный подход является частным случаем задачи поиска наилучшей проекции [31, 32]. Г.П. Кригель [14] отмечает, что в рамках задачи кластеризации и поиска ближайших соседей расширяется количество аспектов проклятия размерностей и дополняется следующими двумя: наличие нерелевантных атрибутов у элементов пространства и сложность проведения корреляционного анализа.

Задачи классификации имеют схожие проблемы что и задачи кластеризации. На практике это сводится к тому, что такие классификато-

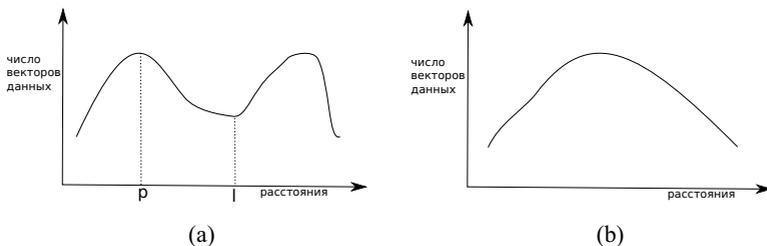


Рис. 2. Распределение расстояний между двумя произвольными векторами: (а) с хорошей отделимостью данных; (б) со сложно разделимыми данными

ры, как, например, линейные, оказываются практически бесполезны в пространстве больших размерностей и фактически являются случайными предположениями. Этот факт подробно рассмотрен Фаном Дж. и Фаном И. в [29].

Описанная проблема проклятия размерности приводит к невозможности эффективно применять индексные структуры, пригодные для пространств малой размерности. В следующих пунктах мы более подробно рассмотрим проблему индексирования, кластеризации и их взаимосвязь в пространствах большой размерности.

**3. Индексирование и поиск в пространствах большой размерности.** Положим, что мы осуществляем поиск в множестве  $V$  векторов-данных в векторном пространстве. В первую очередь нас будет интересовать поиск ближайших соседей. Структуры, которые хорошо применимы для пространств малых размерностей, такие как бинарные деревья,  $k$ - $d$  деревья,  $R$ -деревья, предложенные Гуттманом [17], всевозможные структуры, основанные на разбиении пространства на практике оказываются неэффективными. Рассмотрим причины неэффективности этих структур.  $k$ - $d$  деревья и подобные структуры, основанные на разбиении пространства оказываются неэффективными уже при размерностях  $d \geq 10$ . Р. Вебер в [18] приводит обоснование неэффективности таких структур. Разбиение пространства по каждой координате производит  $N^d$  регионов, где  $d$  - размерность,  $N$  - количество интервалов разбиения по отдельной координате. При  $N = 2$ ,  $d = 100$  мы получим  $2^{100}$  разбиений, что может сильно превзойти количество векторов данных, при этом  $N = 2$  может оказаться слишком малым для обеспечения релевантного поиска. Таким образом, при достаточном количестве координат последовательный перебор всех данных может оказаться существенно быстрее поиска с использованием разбиения всего пространства. Данной проблеме будет подвержен любой запрос, кроме может быть точного совпадения.  $R$ -деревья и их разновидности стал-

квиваются с аналогичной проблемой, которая на практике вырождается в появление большого числа пересекающихся в пространстве ограничивающих прямоугольников [19]. Следующие наблюдения в [18] - разреженность данных. Пусть  $q = [l_{i_1}, r_{i_1}] \times \dots \times [l_{i_m}, r_{i_m}]$  - некоторый запрос-диапазон, длина каждого интервала которого составляет 0.95 от длины всего диапазона данных для этой координаты. Тогда при  $d = 100$  запрос-диапазон накрывает всего лишь  $\sim 0.59\%$  объема прямоугольника, ограничивающего все данные во всем пространстве. Отсюда можно утверждать, что выполняя запросы-диапазоны в том числе и как часть поиска ближайших соседей мы с большой вероятностью просмотрим лишь незначительно малую часть всех данных. Если рассматривать запрос на поиск ближайших соседей, то нас будут интересовать вектора, попадающие внутрь сферы с заданным радиусом. Объем сферы равен:

$$\frac{\pi^{n/2}}{\Gamma(\frac{n}{2} + 1)} \cdot R^d$$

и его значение окажется существенно меньше, чем объем куба с ребром длиной  $2R$ , то есть еще меньше чем для запроса-диапазона. Таким образом, рассматривая сферу вокруг заданной точки мы просмотрим незначительную часть всех данных и для того, чтобы организовать покрытие всего пространства некоторыми ограничивающими регионами, количество элементов этого покрытия должно быть достаточно велико. Это общее соображение не позволяет строить существенно меньший по количеству объектов индекс на основе разбиения всего пространства.

Многие из первых работ в области создания индексов для пространств больших размерностей поднимают вопрос адаптации методик индексирования, пригодных для пространств меньших размерностей. К ним относятся X-деревья, основанные на уменьшении количества пересекающихся регионов R-деревьев, предложенные Берчтольдом и Кригелем в [19]. Для большинства практических задач с размерностью более 10 эти подходы оказываются несостоятельны ввиду невосприимчивости особенностей данных и невозможности анализа их распределения во всем пространстве - проблема неотличимости расстояний не позволяет группировать или кластеризовывать данные, что требуется в приведенных подходах. Добкин и Липтон в [33] предложили точный алгоритм поиска ближайшего соседа за сублинейное от количества данных время:  $O(2^d \log n)$ . При этом время создания индексной структуры оценивается как  $O(n^{2^d})$ . Мейсер [34] предложил алгоритм поиска на основе разбиения пространства гиперплоскостями со сложностью  $O(d^5 \log n)$  и сложностью индексирования  $O(n^d)$ . На практике

эти алгоритмы лишь незначительно выигрывают по скорости у полного перебора, а сложность индексации не позволяет вести динамические обновления данных.

Другой подход — использование случайных проекций и *Local Sensitive Hashing (LSH)*, разработанный П. Индиком в [36]. Он позволяет вести приближенный поиск ближайших соседей. Рассмотрим его подробнее. Назовем семейство хэш-функций  $\mathcal{H} = \{h : S \rightarrow U\}$ , где  $U$  - некоторое пространство хэшей  $(p_1, p_2, r_1, r_2)$  - чувствительными, если для любых  $q, p$  выполнено:

$$p \in B(q, r_1) \Rightarrow P_{\mathcal{H}}(h(p) = h(q)) \geq p_1 \quad (1)$$

$$p \notin B(q, r_2) \Rightarrow P_{\mathcal{H}}(h(p) = h(q)) \leq p_2, \quad (2)$$

где  $B(q, r)$  - шар в пространстве поиска с радиусом  $r$  и центром  $q$ . При этом предполагается, что  $p_1 > p_2$  и  $r_1 < r_2$ . Определим семейство функций  $\mathcal{G}\{g : S \rightarrow U^k\}$  имеющих вид  $g(p) = (h_1(p), \dots, h_k(p))$ ,  $h_j \in \mathcal{H}$ . Далее, для индексации мы выбираем некоторый  $l$  и выбираем произвольный набор функций  $g_1, \dots, g_l$  из  $\mathcal{G}$ . Для каждого вектора данных  $p$  мы вычисляем корзину  $g_j(p)$  для всех  $1 \leq j \leq l$ . Чтобы уменьшить количество корзин мы учитываем только непустые. Запрос  $q$  осуществляется так: выбираются все существующие в индексе корзины  $g_j(q)$ ,  $1 \leq j \leq l$ , далее для всех векторов из этих корзин вычисляется расстояние до  $q$  до тех пор пока не будут найдены все подходящие или некоторая часть подходящих. Сложность индексирования LSH -  $O(nlkt)$ , где  $t$  - сложность вычисления функции из  $\mathcal{H}$ . В качестве функций из  $\mathcal{H}$  могут быть рассмотрены, например, использующие случайную проекцию:  $h(p) = \text{sign}(p \cdot w)$ , где  $w$  - случайно выбранный вектор. Эффективность подхода зависит от выбора  $\mathcal{H}$  и метрики в пространстве поиска. В тоже время, для всех известных семейств  $\mathcal{H}$  можно наблюдать стремительную деградацию показателей релевантности при  $d \gg 10$ . Также проблеме неразличимости расстояний подвержена часть алгоритма поиска, в которой происходит перебор вычисленных корзин  $g_j(q)$ ,  $1 \leq j \leq l$ . Сложность алгоритма поиска  $q$  с помощью LSH -  $O(L(kt + dnp^{\frac{k}{2}}))$  что делает его на практике одним из наиболее быстрых поисков в пространствах большой размерности. Кроме того, простота обновления хэш-таблиц позволяет вести индексирование динамических данных. Подробное описание и проблемы данного подхода рассматриваются в работах Индика и Андони [35, 37]. Упомянутый подход со случайной проекцией может быть рассмотрен как самостоятельное решение задачи поиска. Его можно рассматривать как грубый и быстрый метод редукции размерностей.

*Редукция размерности* — общий подход для борьбы с проклятием размерностей. Рассмотрим основные подходы. Метод главных компонент нацелен на аппроксимацию данных линейными многообразиями существенно меньших размерностей чем исходные. Пирсон в [20] рассматривал способы построения линейных многообразий, аппроксимирующих набор векторов. Эквивалентная формулировка этой задачи - поиск подпространства, заданного набором ортогональных векторов (главных компонент), вдоль которых набор данных имеет наибольшую выборочную дисперсию. Главную компоненту можно рассматривать также как вектор, вдоль которого задан сигнал, соответственно ортогональный ей вектор - направление шума. Решение задачи нахождения главных компонент заключается в нахождении ортогонального базиса пространства собственных векторов матрицы ковариации  $C = X \cdot X^T$ , где  $X$  - матрица, составленная из векторов-данных. В качестве базиса отбираются те вектора, которым соответствуют наибольшие значения собственных чисел. Суть метода - спектральное разложение матрицы  $C$  может быть рассмотрена как задача о сингулярном разложении (SVD) матрицы  $X$ . Вычислительная сложность стандартных алгоритмов оценивается как  $O(nd^2)$ , где  $n$  - количество векторов-данных, а  $d$  - размерность. Подробное описание и случаи применения PCA и SVD рассмотрены в книгах [39, 40].

В качестве многообразий меньших размерностей, аппроксимирующих набор данных можно рассматривать и нелинейные многообразия. На рисунке 3а изображено множество (известное среди исследователей как “Швейцарский рулон”), аппроксимируемое гладким многообразием второго порядка. Одним из алгоритмов, позволяющих выделить аппроксимирующее многообразие называется ISOMAP, предложенный Тененбаумом в [41]. Его суть сводится к следующим шагам: 1) по-

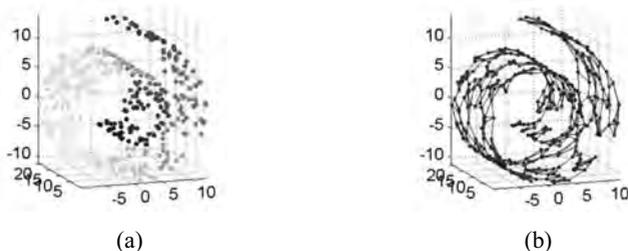


Рис. 3. Множество “Швейцарский Рулон”: (а) исходные данные; (б) граф, связывающий ближайшие соседи

строение графа, связывающего ближайших соседей (на рисунке 3b); 2) определение новой метрики  $dist(x_i, x_j)$  между точками на графе, как кратчайший путь на этом графе. 3) применение метода мультиразмерностного шкалирования, описанного в [42,43]. Сложность ISOMAP оценивается как  $O(n^2 \log n + n^2 d)$ .

Большинство работ по редукции размерности не рассматривает ее применение к задачи индексации и поиска. Небольшой обзор применимости PCA к задачи поиска ближайших соседей рассмотрен в [38]. Однако, одна из работ успешно сочетает редукцию размерностей путем проекций на линейные подпространства с традиционными методами сжатия информации для индексации. В работе Р. Дугласа [44] рассматривается файл приближенных векторов (Vector approximation file, VA-файл). Эта работа вводит KVA-файлы (Ядерный VA-файл), которые расширяют VA-Файлы. Результаты экспериментов с использованием больших наборов данных изображений (примерно 100000 изображений с размерностью в 463 координат) доказывают эффективность этого метода.

Главным теоретическим недостатком рассмотренных методов редукции размерностей является его глобальность: анализируется весь набор данных сразу, в то время как для отдельных его частей могут быть выявлены различные аппроксимирующие многообразия. Локальные методы будут рассмотрены в следующем пункте в рамках проблемы кластеризации. Еще одним недостатком является высокая вычислительная сложность. Как было указано, PCA имеет сложность  $O(nd^2)$ , ISOMAP -  $O(n^2 \log n + n^2 d)$ . На практике такая сложность вынуждает отказываться от подобных алгоритмов, в случае если данные обновляются динамически. Вопросы о разработки инкрементальных алгоритмов редукции и применении редукции к индексированию являются предметом исследований.

**4. Кластеризация в пространствах большой размерности.** Работа Кригеля [14] является первым наиболее подробным обзором алгоритмов кластеризации в пространствах большой размерности, в которой приведена классификация алгоритмов, их сравнение и анализ применимости. *Подпространственная кластеризация (Subspace clustering)* и *проекционная кластеризация (projection clustering)* рассмотренные в [14, 15] нацелены на нахождение подмножеств элементов близких друг к другу в определенных подпространствах, как, например, показано на рисунке 4. Подразумевается, что подпространства могут быть как и параллельны осям координат так и произвольно ориентированы. Алгоритмы проекционной кластеризации нацелены на нахождение

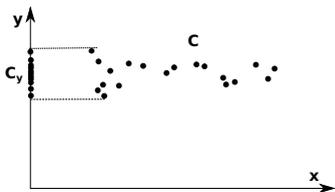


Рис. 4. Набор данных  $C$  образует кластер в подпространстве  $Y$

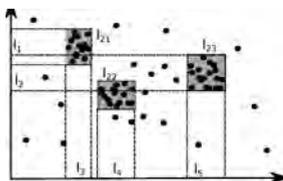


Рис. 5. Пример алгоритма, действующего снизу вверх, обнаруживающего прямоугольники с большой плотностью данных

ние подпространств, в которых элементы образуют кластера. Подпространственная кластеризация [14, 15] напротив, нацелена на нахождение всех кластеров во всех возможных подпространствах. С алгоритмической точки зрения подходы можно разделить на следующие: сверху вниз: [14, 15], когда кластера сначала ищутся в пространствах больших размерностей, а затем осуществляется переход к более низкоразмерным пространствам, и снизу вверх — сначала ищутся кластера в одномерных пространствах, затем в двумерных и так далее. Конкретные реализации алгоритмов предложены в работах [22, 24, 27, 28]

На рисунке 5 изображен пример алгоритма [28] действующего снизу вверх, который с помощью построения сетки с адаптивным размером ячеек выявляет сначала отрезки  $l_1, \dots, l_5$  со скоплениями данных в одномерных пространствах, затем, пересекая их для разных координат, выявляет отрезки в двумерных пространствах:  $l_{21}, l_{22}, l_{23}$ . Алгоритм продолжает работу, пока для размерности  $d'$  не будет обнаружено достаточно плотных пересечений. Алгоритмы типа [27] начиная с полного пространства делают две выборки  $C$  - предполагаемые центроиды кластеров и  $S$  - предполагаемые данные из кластеров. Далее действуют как алгоритм  $k$ -средних ( $k$ -means), но кроме того, определяют на каждом шаге релевантные размерности.

У данных алгоритмов существует преимущество перед детальным статистическим анализом данных, основанном на анализе распределения. Во-первых, эти алгоритмы локальны. Для определенного подмножества данных они способны отыскать наиболее подходящее подпространство, в то время как многие алгоритмы размерностной редукции нацелены на поиск одного подпространства для всех данных. Во-вторых, они имеют сложность порядка  $O(nd)$ .

Следующий класс алгоритмов кластеризации в пространствах большой размерности - *спектральная кластеризация* рассмотренный

в [46, 47]. Спектральная кластеризация нацелена на отыскание кластеров в произвольно ориентированных линейных подпространствах. В ее основе лежит следующий принцип: пусть  $W$  - матрица расстояний между векторами из набора данных  $X$  размером  $N$ . Определим лапласиан матрицы  $W$  как :  $L = D - W$ , где  $D_{ij} = 0$  для  $i \neq j$  и  $D_{ii} = \sum_{1 \leq j \leq N} W_{ij}$ . Алгоритм спектральной кластеризации сводится к нахождению  $L$ , вычислению собственных  $k$  векторов  $u_1, \dots, u_k$ . Вектора выбираются соответствующие наименьшим собственным числам. Далее, применяя известный алгоритм кластеризации, например,  $k$ -средних к строкам матрицы  $U$ , составленной из  $u_1, \dots, u_k$  в качестве столбцов. Полученные кластера в пространстве, натянутом на  $u_1, \dots, u_k$  и есть искомые. В начале работы алгоритма необходимо произвести построение  $W$  - матрицы расстояний. Стоит отметить, что можно учитывать только те расстояния между векторами, которые меньше некоторого порога  $\epsilon$ . Интересный подход к построению  $W$  разработан и описан в [45]. Предварительно, для каждого вектора  $x$  из изначального набора данных ищется его представление через другие вектора. На языке матриц решается задача:

$$R = ?, \quad X = XR, \quad R_{ii} = 0, \quad 1 \leq i \leq N.$$

Причем, для нахождения наиболее компактного такого представления ищется наименьшая по норме матрица:  $\|R\|_{l_1} \rightarrow \min$ .  $R$  дает нам представление каждого вектора на некоторой гиперплоскости, все пространство поиска представляется как объединение набора гиперплоскостей. Здесь  $W$  может быть выражена как  $W = R + R^T$ . Подобный подход позволяет перейти к спектральной кластеризации набора дизъюнктивных множеств векторов, каждый из которых лежит в отдельной гиперплоскости. Подход получил название *разреженная подпространственная кластеризация (sparse subspace clustering)*.

Интересны также алгоритмы, позволяющие совмещать различные результаты кластеризации для одного и того же набора данных. Данные алгоритмы имеют название Consensus clustering и подробно описаны в исследовании Стрехля и Гоша [26]. Они могут применяться в том случае, если данные были получены из разных источников и сформировано несколько наборов кластеров, что возможно в случае распределенных систем. Основным минусом алгоритмов, рассмотренных в [26] является их сложность:  $O(nkr)$  - в лучшем случае, где  $n$  - количество всех векторов-данных,  $r$  - количество источников данных,  $k$  - количество всех известных кластеров. Такая сложность делает затруднительным вычисление совмещенного набора кластеров в реаль-

ном времени.

Также оказываются важны исследования проблемы избыточности подпространственной кластеризации, подробно изученные в [22, 23]. Поднимается еще один аспект проклятия размерностей: наборы кластеров во всех рассмотренных подпространствах могут содержать существенно большее количество элементов чем в одном пространстве малой размерности. Обуславливается это наличием  $2^d$  возможных подпространств, где  $d$  - размерность исходного пространства. Часть кластеров в пространствах меньшей размерности может пересекаться с кластерами большей размерности. Возникает избыточность таких наборов. Как правило, кластера обнаруженные в подпространствах большей размерности считаются более интересными, однако для того чтобы назначить кластеру значение его ценности в [22] вводят более общую модель. Пусть определен подпространственный кластер  $c = (S, X)$ , где  $S$  - подпространство, а  $X$  - подмножество векторов. В [22] вводят следующую функцию полезности кластера  $c$ :

$$value(c) = \frac{|Covered(X)|}{k(S, X)},$$

где  $Covered(X)$  - множество элементов из  $X$  не покрытых никаким другим известным кластером  $c'$ , а  $k(S, X)$  - функция избыточности кластера, например, размерность  $S$ . Введение подобных  $value(c)$  функций может быть частично решено при помощи методов поиска наилучшей проекции, предложенных в работах Хьюбера [31] и Фридмана [32].

**5. Применение результата кластеризации к построению индексной структуры для поиска ближайших соседей.** Задача поиска ближайших соседей (KNN-поиск) в пространстве большой размерности требует построения индексной структуры, проблемы которой описаны выше. Невозможность проводить кластеризацию в пространстве большой размерности также делает невозможность построения индексных деревьев на основе кластеров. Интерес вызывает использование подпространственных кластеров. В простейшем случае, индексом может являться набор представлений кластеров в подпространстве, а в качестве алгоритма поиска - классификация запроса относительно рассматриваемого множества кластеров. Рассмотрение кластеров помогает существенно сократить поиск, для данных с определенным распределением, в то время как для данных с большим количеством некластеризованных объектов (outliers) этот подход неэффективен. По сравнению с базовыми алгоритмами редукции размерностей, подпространственная кластеризация позволяет выявлять подходящие многообразия меньшей

размерности локально, то есть применительно к ограниченному набору векторов-данных, что делает ее более точным подходом.

Ввиду того, что различные алгоритмы кластеризации для пространств большой размерности могут выявлять наборы кластеров с различными параметрами и, в соответствии с различными моделями, возникает вопрос о нахождении наилучшего подмножества кластеров для использования в индексе.

На текущий момент вопрос применения подпространственной кластеризации к задаче индексирования в пространствах большой размерности остается открытым. В работе Гюннемана [21] предложена иерархическая индексная структура на основе подпространственных кластеров, позволяющая вести как точный поиск так и поиск ближайших соседей. Основной проблемой использования алгоритмов подпространственной кластеризации для индексирования является ее вычислительная сложность и невозможность вести динамическое обновление индекса за приемлемое время. В этом случае требуется разработать адаптации вышеописанных алгоритмов кластеризации к динамическим данным.

**6. Заключение.** Индексирование данных большой размерности - значительно более сложная задача, чем построение индексов для малого количества атрибутов. Индексация требует применения алгоритмов машинного обучения и анализа данных, таких как редукция размерностей и кластеризации в виду того, что основная ее проблема - проклятие размерностей, концептуально неразрешима для определенных наборов данных без перехода к подпространствам. Индексная структура с точки зрения практики должна поддерживать такие операции как динамическое обновление и иметь возможность создаваться распределённо (на нескольких вычислительных узлах). Однако, большинство известных алгоритмов кластеризации и редукции размерности, необходимых для индексации, крайне трудоемки и не имеют версий для динамических данных и распределенных вычислительных сред. В качестве двух основных вопросов, требующих решения в рамках задачи индексации в пространстве большой размерностей мы выделяем:

1. Разработка алгоритмов и оптимизация, применяющих подпространственную кластеризацию для создания индекса.
2. Оптимизация необходимых алгоритмов анализа данных для ведения инкрементальной (динамической) индексации и выполнения ее в распределенных средах.

Отсутствие единого и эффективного теоретического подхода к индексированию данных большой размерности привело к тому, что на

практике нет общепринятой технологии, позволяющей строить базы данных большой размерности. В то же время, наличие баз данных для распределенных вычислений, например, использующих MapReduce, позволяет несколько упростить решение частных задач индексирования и поиска.

### Литература

1. *Donoho D. L.* High-dimensional data analysis: the curses and blessings of dimensionality // American Mathematical Society Conf. Math Challenges of the 21st Century 2000.
2. *Manning C.D., Raghavan P., Schütze H.* Introduction to Information Retrieval // American Mathematical Society Conf. Math Challenges of the 21st Century 2000.
3. *Augenlicht L. H., Kobrin D.* Cloning and Screening of Sequences Expressed in a Mouse Colon Tumor // Cancer Research. 1982. vol.42. pp. 1088-1093.
4. *Dash M., Liu H.* Feature Selection for Classification // Intelligent Data Analysis. 1997. vol.1. pp. 131-156.
5. *Jain A.K., Duin R.P.W., Jianchang M.* Statistical pattern recognition: a review // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. 2000. vol.22. pp. 4-37.
6. *Koller D., Sahami M.* Toward optimal feature selection // In 13th International Conference on Machine Learning. 1995. pp. 284-292.
7. *Glazko G., Coleman M., Mushegian A.* Similarity searches in genome-wide numerical data sets // Biology Direct. 2006. vol.1.
8. *Yan T., Ganesan D., Manmatha R.* Distributed Image Search in Sensor Networks // Proceeding SenSys '08 Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems. 2008.
9. *Deshpande A., Guestrin C., Madden S.R., Hellerstein J.M., Hongn W.* Model-driven data acquisition in sensor networks // Proceeding VLDB '04 Proceedings of the Thirtieth international conference on Very large data bases. 2004. vol.30. pp. 588-599.
10. *Russell S.J., Norvig P., Canny J.F., Malik J.M. Edwards D.D.* Artificial intelligence: a modern approach // Prentice hall Englewood Cliffs. 1995.
11. *Bellman R. E.* Dynamic programming // Princeton University Press. 1957.
12. *Beyer K., Goldstein J., Ramakrishnan R., Shaft U.* When Is Nearest Neighbor Meaningful // ICDT '99 Proceedings of the 7th International Conference on Database Theory. 1999. pp. 217-235.
13. *Hinneburg A., Aggarwal C., Keim D.A.* What Is the Nearest Neighbor in High Dimensional Spaces // VLDB '00 Proceedings of the 26th International Conference on Very Large Data Bases. 2000. pp. 506-515.
14. *Kriegel H.-P., Kröger P., Zimek A.* Clustering high-dimensional data: A survey on subspace clustering, pattern-based clustering // ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data. 2009. vol.3 no.3. pp. 506-515.

15. *Parsons L., Haque E., Liu H.* Subspace clustering for high dimensional data: a review // ACM SIGKDD Explorations Newsletter - Special issue on learning from imbalanced dataset. 2004. vol.6.
16. *Böhm C., Berchtold S., Keim D.A.* Searching in high-dimensional spaces: Index structures for improving the performance of multimedia databases // ACM Computing Surveys (CSUR). 2001. no.33. vol.3.
17. *Guttman A.* R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching // Proceedings of 1984 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. 1984. pp. 47-57.
18. *Weber R., Schek H.-J., Blott S.* A Quantitative Analysis and Performance Study for Similarity-Search Methods in High-Dimensional Spaces // VLDB'98, Proceedings of 24rd International Conference on Very Large Data Bases. 1998. pp. 194-205.
19. *Berchtold S., Keim D. A., Kriegel H.-P.* The X-tree: An Index Structure for High-Dimensional Data // VLDB '96 Proceedings of the 22th International Conference on Very Large Data Bases. 1996. pp. 28-39.
20. *Pearson K.* Near-optimal hashing algorithms for approximate nearest neighbor in high dimensions // Philosophical Magazine Bases. 1901. vol.2. pp. 559-572.
21. *Gunnemann S., Kremer H., Lenhard D., Seidl T.* Subspace Clustering for Indexing High Dimensional Data: A Main Memory Index based on Local Reductions and Individual Multi-Representations // Proc. International Conference on Extending Database Technology. 2011. pp. 237-248.
22. *Müller E., Assent I., Günnemann S., Krieger R., Seidl T.* Relevant Subspace Clustering: Mining the Most Interesting Non-Redundant Concepts in High Dimensional Database // Proc. IEEE International Conference on Data Minings. 2009. pp. 377-386.
23. *Assent I., Krieger R., Miller E., Seidl T.* INSCY: Indexing subspace clusters with in-process-removal of redundancy // Data Mining, 2008. ICDM '08. Eighth IEEE International Conference. 2008. pp. 719-724.
24. *Assent I., Krieger R., Miller E., Seidl T.* EDSC: efficient density-based subspace clustering // Proceedings of the 17th ACM conference on Information and knowledge management. 2008. pp. 1093-1102.
25. *Houle M. E., Kriegel H.-P., Kröger P., Schubert E., Zimek A.* Can Shared-Neighbor Distances Defeat the Curse of Dimensionality? // Scientific and Statistical Database Management. 2010. pp. 482-500.
26. *Strehl A., Ghosh J.* Cluster ensembles — a knowledge reuse framework for combining multiple partitions // The Journal of Machine Learning Research. 2003. pp. 583-617.
27. *Aggarwal C.C., Wolf J.L., Phillip S., Yu C.P., Jong S.P.* Fast algorithms for projected clustering // Proceedings of the 1999 ACM SIGMOD international conference on Management of data. 1999. pp. 61-72.
28. *Nagesh H., Goil S.* Adaptive Grids for Clustering Massive Data Sets // SIAM International Conference on Data Mining - SDM. 2002.
- 40 SPIIRAS Proceedings. 2014. Issue 2(33). ISSN 2078-9181 (print), ISSN 2078-9599 (online) [www.proceedings.spiiras.nw.ru](http://www.proceedings.spiiras.nw.ru)

29. *Fan J., Fan Y., Wu Y.* High-dimensional classification // World Scientific, New Jersey. 2011. pp. 3-37.
30. *Silverman B.* Density Estimation for Statistics and Data Analysis // Monographs on Statistics and Applied Probability, London: Chapman and Hall. 1986.
31. *Huber P.J.* Projection Pursuit // The Annals of Statistics. 1985. vol.2. no.13. pp. 435–475.
32. *Friedman J.H.* Exploratory projection pursuit // Journal of American Statistical Association. 1987. no.82. pp. 249–266.
33. *Dobkin D., Lipton R.J.* Multidimensional Searching Problems // SIAM Journal on Computing. 1974. no.5. pp. 181–186.
34. *Meiser S.* Point location in arrangement of hyperplanes // Information and Computation. 1993. no.106. pp. 286–303.
35. *Andoni A., Indyk P.* Near-optimal hashing algorithms for approximate nearest neighbor in high dimensions // Communications of the ACM - 50th anniversary issue. 2008. vol.51. pp. 117-122.
36. *Indyk P., Motwani R.* Approximate nearest neighbors: towards removing the curse of dimensionality // Proceedings of the thirtieth annual ACM symposium on Theory of computing. 1998. pp. 604-613.
37. *Datar M., Immorlica N., Indyk P., Mirrokni V.S.* Locality-sensitive hashing scheme based on p-stable distributions // Proceedings of the twentieth annual symposium on Computational geometry. 2004. pp. 253-262.
38. *Deegalla S., Bostrom H.* Reducing High-Dimensional Data by Principal Component Analysis vs. Random Projection for Nearest Neighbor Classification // Proceedings of the 5th International Conference on Machine Learning and Applications. 2006. pp. 245-250.
39. *Ian J.* Principal component analysis // Wiley Online Library. 2005.
40. *Gorban A. N.* Principal manifolds for data visualization and dimension reduction // Springer. 2007. vol.58.
41. *Tenenbaum J.B., De Silva V., Langford J.C.* A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction // Science. 2000. vol.290. no.5500. pp. 2319–2323.
42. *Kruskal J.B.* Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis // Psychometrika. 1964. vol.29. no.1. pp. 1-27.
43. *Cox T.F., Cox M.A.A.* Multidimensional scaling // CRC Press. 2010.
44. *Heisterkamp D.R., Peng J.* Kernel VA-files for relevance feedback retrieval // Proceedings of the 1st ACM international workshop on Multimedia databases. 2003. pp. 48-54.
45. *Heisterkamp D.R., Peng J.* Sparse subspace clustering // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR 2009. 2009. pp. 2790-2797.
46. *Von Luxburg U.* A tutorial on spectral clustering // Statistics and computing. 2009. vol.17. pp. 395-416.

47. Shi J., Malik J. Normalized cuts and image segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. vol.22. pp. 888–905.

## References

1. Donoho D. L. High-dimensional data analysis: the curses and blessings of dimensionality. American Mathematical Society Conf. Math Challenges of the 21st Century 2000.
  2. Manning C.D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval. American Mathematical Society Conf. Math Challenges of the 21st Century 2000.
  3. Augenlicht L. H., Kobrin D. Cloning and Screening of Sequences Expressed in a Mouse Colon Tumor. Cancer Research. 1982. vol.42. pp. 1088-1093.
  4. Dash M., Liu H. Feature Selection for Classification. Intelligent Data Analysis. 1997. vol.1. pp. 131-156.
  5. Jain A.K., Duin R.P.W., Jianchang M. Statistical pattern recognition: a review. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. 2000. vol.22. pp. 4-37.
  6. Koller D., Sahami M. Toward optimal feature selection. In 13th International Conference on Machine Learning. 1995. pp. 284–292.
  7. Glazko G., Coleman M., Mushegian A. Similarity searches in genome-wide numerical data sets. Biology Direct. 2006. vol.1.
  8. Yan T., Ganesan D., Manmatha R. Distributed Image Search in Sensor Networks. Proceeding SenSys '08 Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems. 2008.
  9. Deshpande A., Guestrin C., Madden S.R., Hellerstein J.M., Hongn W. Model-driven data acquisition in sensor networks. Proceeding VLDB '04 Proceedings of the Thirtieth international conference on Very large data bases. 2004. vol.30. pp. 588-599.
  10. Russell S.J., Norvig P., Canny J.F., Malik J.M., Edwards D.D. Artificial intelligence: a modern approach. Prentice hall Englewood Cliffs. 1995.
  11. Bellman R. E. Dynamic programming. Princeton University Press. 1957.
  12. Beyer K., Goldstein J., Ramakrishnan R., Shaft U. When Is Nearest Neighbor Meaningful. ICDT '99 Proceedings of the 7th International Conference on Database Theory. 1999. pp. 217-235.
  13. Hinneburg A., Aggarwal C., Keim D.A. What Is the Nearest Neighbor in High Dimensional Spaces. VLDB '00 Proceedings of the 26th International Conference on Very Large Data Bases. 2000. pp. 506-515.
  14. Kriegel H.-P., Kröger P., Zimek A. Clustering high-dimensional data: A survey on subspace clustering, pattern-based clustering. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data. 2009. vol.3 no.3. pp. 506-515.
  15. Parsons L., Haque E., Liu H. Subspace clustering for high dimensional data: a review. ACM SIGKDD Explorations Newsletter - Special issue on learning from imbalanced dataset. 2004. vol.6.
- 42 SPIIRAS Proceedings. 2014. Issue 2(33). ISSN 2078-9181 (print), ISSN 2078-9599 (online)  
[www.proceedings.spiiras.nw.ru](http://www.proceedings.spiiras.nw.ru)

16. Böhm C., Berchtold S., Keim D.A. Searching in high-dimensional spaces: Index structures for improving the performance of multimedia databases. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2001. no.33. vol.3.
17. Guttman A. R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching. *Proceedings of 1984 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. 1984. pp. 47-57.
18. Weber R., Schek H.-J., Blott S. A Quantitative Analysis and Performance Study for Similarity-Search Methods in High-Dimensional Spaces. *VLDB'98, Proceedings of 24rd International Conference on Very Large Data Bases*. 1998. pp. 194-205.
19. Berchtold S., Keim D. A., Kriegel H.-P. The X-tree: An Index Structure for High-Dimensional Data. *VLDB '96 Proceedings of the 22th International Conference on Very Large Data Bases*. 1996. pp. 28-39.
20. Pearson K. Near-optimal hashing algorithms for approximate nearest neighbor in high dimensions. *Philosophical Magazine Bases*. 1901. vol.2. pp. 559-572.
21. Gunnemann S., Kremer H., Lenhard D., Seidl T. Subspace Clustering for Indexing High Dimensional Data: A Main Memory Index based on Local Reductions and Individual Multi-Representations. *Proc. International Conference on Extending Database Technology*. 2011. pp. 237-248.
22. Müller E., Assent I., Günemann S., Krieger R., Seidl T. Relevant Subspace Clustering: Mining the Most Interesting Non-Redundant Concepts in High Dimensional Database. *Proc. IEEE International Conference on Data Minings*. 2009. pp. 377-386.
23. Assent I., Krieger R., Miller E., Seidl T. INSCY: Indexing subspace clusters with in-process-removal of redundancy. *Data Mining, 2008. ICDM '08. Eighth IEEE International Conference*. 2008. pp. 719-724.
24. Assent I., Krieger R., Miller E., Seidl T. EDSC: efficient density-based subspace clustering. *Proceedings of the 17th ACM conference on Information and knowledge management*. 2008. pp. 1093-1102.
25. Houle M. E., Kriegel H.-P., Kröger P., Schubert E., Zimek A. Can Shared-Neighbor Distances Defeat the Curse of Dimensionality?. *Scientific and Statistical Database Management*. 2010. pp. 482-500.
26. Strehl A., Ghosh J. Cluster ensembles – a knowledge reuse framework for combining multiple partitions. *The Journal of Machine Learning Research*. 2003. pp. 583-617.
27. Aggarwal C.C., Wolf J.L., Phillip S., Yu C.P., Jong S.P. Fast algorithms for projected clustering. *Proceedings of the 1999 ACM SIGMOD international conference on Management of data*. 1999. pp. 61-72.
28. Nagesh H., Goil S. Adaptive Grids for Clustering Massive Data Sets. *SIAM International Conference on Data Mining - SDM*. 2002.
29. Fan J., Fan Y., Wu Y. *High-dimensional classification*. World Scientific, New Jersey. 2011. pp. 3-37.

30. Silverman B. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. Monographs on Statistics and Applied Probability, London: Chapman and Hall. 1986.
31. Huber P.J. Projection Pursuit. The Annals of Statistics. 1985. vol.2. no.13. pp. 435–475.
32. Friedman J.H. Exploratory projection pursuit. Journal of American Statistical Association. 1987. no.82. pp. 249–266.
33. Dobkin D., Lipton R.J. Multidimensional Searching Problems. SIAM Journal on Computing. 1974. no.5. pp. 181–186.
34. Meiser S. Point location in arrangement of hyperplanes. Information and Computation. 1993. no.106. pp. 286–303.
35. Andoni A., Indyk P. Near-optimal hashing algorithms for approximate nearest neighbor in high dimensions. Communications of the ACM - 50th anniversary issue. 2008. vol.51. pp. 117-122.
36. Indyk P., Motwani R. Approximate nearest neighbors: towards removing the curse of dimensionality. Proceedings of the thirtieth annual ACM symposium on Theory of computing. 1998. pp. 604-613.
37. Datar M., Immorlica N., Indyk P., Mirrokni V.S. Locality-sensitive hashing scheme based on p-stable distributions. Proceedings of the twentieth annual symposium on Computational geometry. 2004. pp. 253-262.
38. Deegalla S., Bostrom H. Reducing High-Dimensional Data by Principal Component Analysis vs. Random Projection for Nearest Neighbor Classification. Proceedings of the 5th International Conference on Machine Learning and Applications. 2006. pp. 245-250.
39. Ian J. Principal component analysis. Wiley Online Library. 2005.
40. Gorban A. N. Principal manifolds for data visualization and dimension reduction. Springer. 2007. vol.58.
41. Tenenbaum J.B., De Silva V., Langford J.C. A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction. Science. 2000. vol.290. no.5500. pp. 2319–2323.
42. Kruskal J.B. Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. Psychometrika. 1964. vol.29. no.1. pp. 1-27.
43. Cox T.F., Cox M.A.A. Multidimensional scaling. CRC Press. 2010.
44. Heisterkamp D.R., Peng J. Kernel VA-files for relevance feedback retrieval. Proceedings of the 1st ACM international workshop on Multimedia databases. 2003. pp. 48-54.
45. Heisterkamp D.R., Peng J. Sparse subspace clustering. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR 2009. 2009. pp. 2790-2797.
46. Von Luxburg U. A tutorial on spectral clustering. Statistics and computing. 2009. vol.17. pp. 395-416.
47. Shi J., Malik J. Normalized cuts and image segmentation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. vol.22. pp. 888–905.

**Новиков Борис Асенович** — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-аналитических систем математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов: методы организации информации, базы данных, индексирование, кластеризация, оптимизация запросов. Число научных публикаций — 46. [borisnov@acm.org](mailto:borisnov@acm.org), [http://www.math.spbu.ru/user/boris\\_novikov](http://www.math.spbu.ru/user/boris_novikov); Университетский проспект, дом 28, Санкт-Петербург, 198504, Россия; р.т. +7 921 914 8534.

**Novikov Boris** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of departemnt of Analytical Information Systems Science, Faculty of Mathematics and Mechanics, Saint-Petersburg State University. Research interests: information managment, databases, indexing, clustering, query optimization. Number of publications — 46. [borisnov@acm.org](mailto:borisnov@acm.org), [http://www.math.spbu.ru/user/boris\\_novikov](http://www.math.spbu.ru/user/boris_novikov); 28, Universitetskiy avenue, St. Petersburg, 198504, Russia; office phone +7 921 914 8534.

**Судос Иван Викторович** — аспирант кафедры информационно-аналитических систем математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов: методы организации информации, информационный поиск, индексирование, кластеризация. Число научных публикаций — 1. [iv.teh.adr@gmail.com](mailto:iv.teh.adr@gmail.com), <http://blog.sudos.net>; Университетский проспект, дом 28, Санкт-Петербург, 198504, Россия; р.т. +7 921 747 81 61.

**Sudos Ivan** — Ph.D. student of departemnt of Analytical Information Systems Science, Faculty of Mathematics and Mechanics, Saint-Petersburg State University. Research interests: information managment, information retrieval, indexing, clustering. The number of publications — 1. [iv.teh.adr@gmail.com](mailto:iv.teh.adr@gmail.com), <http://blog.sudos.net>; 28, Universitetskiy avenue, St. Petersburg, 198504, Russia; office phone +7 921 747 81 61

## РЕФЕРАТ

### *Новиков Б.А., Судос И.В.* **Индексирование данных в пространстве большой размерности.**

В статье производится обзор проблем и решений задачи индексации в рамках задачи поиска ближайших соседей в пространствах большой размерности. Данные в пространствах большой размерности характеризуются наличием большого количества атрибутов и могут быть рассмотрены как векторное представление сложных объектов, таких как изображения, сигналы, временные ряды. Авторы статьи ставят задачу оценивания сложности индексирования и поиска ближайших соседей в пространствах большой размерности, которые не возникают в пространствах размерности не более 3. Для этого осуществляется обзор работ, посвященных фундаментальной проблеме "проклятия размерности" и способам ее разрешения.

Статья состоит из частей: 1) Введение, 2) Проблемы индексации и поиска в пространствах большой размерности, 3) Индексирование и поиск в пространствах большой размерности, 4) Кластеризация в пространствах большой размерности, 5) Применение результата кластеризации к построению индексной структуры для поиска ближайших соседей, 6) Заключение. Во введении формулируется задача поиска в пространстве больших размерностей, обозначаются примеры практического применения, также указывается наличие некоторых теоретических проблем и влияния аппаратных ограничений. Во второй части раскрывается суть проблем поиска и индексации в пространствах большой размерности. Описываются сопутствующие аспекты проклятия размерности. В третьей части приводится обзор существующих попыток разрешить обозначенные проблемы индексирования. Рассмотрены алгоритмы, предложенные в работах, дана оценка их применимости. В четвертой части производится обзор работ посвященных задаче кластеризации в пространствах большой размерности. Указывается ряд проблем, успешно преодоленный рассмотренными алгоритмами. Данные проблемы имеют много общего с проблемами в индексировании. Пятая часть ставит вопрос о возможном применении результатов кластеризации в пространствах большой размерности к индексированию. В заключении обобщаются проблемы, обозначенные в обозреваемых работах и выделяется два основных направления исследования.

Авторы подробно дают описание теоретическим аспектам, при рассмотрении существующих работ в области индексирования данных большой размерности, авторы приводят возможные проблемы, не указанные в работах, такие, например, высокая вычислительная сложность. В частности ставится под сомнение эффективность применения алгоритмов размерностной редукции в случае динамически обновляемых данных.

## SUMMARY

*Novikov B.A., Sudos I.V. Indexing of data in high dimensional spaces.*

The survey of the problems and solutions of the indexing problem in the scope of nearest neighbour search in high dimensional spaces problem is conducted in the article. High dimensional data is characterized with a large number of attributes and can be considered as a vector representation of complex objects such as images, signals and time series. Authors of the paper pose a problem to determine a difficulties of indexing and search of nearest neighbours in the high dimensional spaces that are not essential for in the spaces with dimensionality 3 or less. For this purpose, the survey of the works devoted to the fundamental problem of the Curse of dimensionality. The works on the curse of dimensionality and the ways of fighting it are regarded.

The article comprise the following sections: 1) Introduction, 2) The problems of indexing and search in the high dimensional space, 3) Indexing an search in high dimensional spaces, 4) Clustering in high dimensional spaces. 5) Application of clustering result to the construction of index structure for a nearest neighbours search 6) Conclusion. The problem of search in high dimensional spaces is posed in the introduction, the applied examples are noted and the existence of some theoretical problems and hardware limitations are given. The second section discovers the core of search and indexing difficulties. The associated aspects of the curse of dimensionality are described. The survey of the existing attempts to resolve the mentioned difficulties is given in the third section. The algorithms proposed in the works are considered and the evaluation of their applicability is given. The survey of the works devoted to the clustering in high dimensional spaces is conducted in the fourth section. The range of difficulties that is successfully overcome by the algorithms considered. The given problems have the same nature with indexing problems. The fifth section rise the question on the possible application of the clustering result in high dimensional spaces to indexing. The conclusion generalizes observed problem and two major directions of research are emphasized.

Authors give a possible difficulties such as computational complexity of high dimensional data indexing that are not specified in the works. In particular, the possibility of dimensional reduction algorithms application is impugned in the case of dynamically updated data.

А.А. МУСАЕВ

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ИНЕРЦИОННОСТИ ХАОТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

---

*Мусаев А.А. Численный анализ инерционности хаотических процессов.*

**Аннотация.** На основе серии вычислительных экспериментов рассмотрен фундаментальный вопрос о наличии инерционности в квазихаотических процессах. В качестве полигона данных используются длительные интервалы наблюдений за котировками валютных инструментов на электронном рынке Forex. Для обеспечения наглядной визуализации используется технология динамической сегментации диапазона изменения наблюдаемого процесса. Установлено, что гипотеза о наличии инерционности подтверждается лишь для сглаженного процесса.

**Ключевые слова:** хаотические процессы, сегментация, инерционность, Forex.

*Musaev A.A. Numerical Analysis of Chaotic Processes Persistence.*

**Abstract.** The fundamental problem of existence inertia effect in quasichaotic processes on the basis of a computing experiments series is considered. As the data polygon are used long intervals of supervision over currency tools quotations in the electronic market Forex. The technology of observed dynamic segmentation process for ensuring visualization is used. It is established that the hypothesis of existence of inertia effect is confirmed only for smoothed process.

**Keywords:** chaotic process, segmentation, persistence, Forex.

---

**1. Введение.** Вопрос инерционности хаотического процесса требует уточнения самих определяющих понятий хаотичности и инерционности для нематериальных объектов.

Понятие *хаотичности* связано с более высоким уровнем неопределенности, чем в модели, описываемой вероятностно-статистической парадигмой. В случае если изучаемый процесс находится под влиянием непрерывно меняющейся нестационарной среды погружения, нарушается основополагающее предположение теории вероятностей о возможности повторных наблюдений событий в неизменных условиях. По-видимому, наиболее высокий уровень хаотичности связан с практически непрерывными скачкообразными изменениями нестационарной среды, непосредственно воздействующей на изучаемый процесс. Генезис такого явления наиболее хорошо описывается моделью детерминированного хаоса [1, 2], связанного с возникновением точек неустойчивости (бифуркаций) в динамике развития открытых нелинейных систем. В частности, такие процессы характерны для турбулентных гидро- и газодинамических систем, а также при описании некоторых социально-экономических явлений.

В рамках настоящей статьи под хаотическим процессом будем понимать колебательный непериодический ряд наблюдений с аддитивной чисто случайной нестационарной составляющей. Такая модель

достаточно характерна, например, для динамики котировок рыночных активов. Под влиянием многочисленных информационных воздействий наблюдения котировок образуют динамический процесс очень сложной природы, практически не допускающий формирования долгосрочного или среднесрочного прогноза.

Понятие «инерционности», относится, прежде всего, к материальным субстанциям – веществу и энергии. Традиционное определение инерционности, как способности физического тела продолжать равномерное прямолинейное движение, не допускает прямой перенос на информационные процессы, определяющиеся через плохо формализуемые психологические, экономические, политические, военные и другие факторы. Поэтому под инерционностью таких нематериальных (информационных) процессов будем понимать способность сохранять тренд как общее направление развития, в течение некоторого ограниченного интервала времени.

В контексте решаемой задачи, инерционность оценивается как способность исследуемого процесса сохранить ранее обнаруженный тренд от уровня, на котором он был фиксирован, до момента его пересечения следующего (по направлению установленного тренда) уровня. В случаях, когда процесс разворачивается и достигает противоположного уровня, соответствующий фрагмент эксперимента будет рассматриваться как событие, противоречащее гипотезе инерционности. Данный подход хорошо сочетается с задачами электронного трейдинга, когда выигрыш (TP, Take Profit) достигается в случае, когда процесс дойдет до заданного уровня раньше, чем, после разворота, он выйдет на уровень ограничения потерь (SL, Stop Loss).

При использовании такого определения и статистического подхода к оценке свойств изучаемого процесса, в качестве критерия наличия инерционности будет использоваться оценка вероятности (точнее, частота) события, заключающегося в том, что процесс пересечет уровень подтверждения наличия тренда раньше, чем уровня отрицания.

Следует заметить, что апостериорное наблюдение реализаций хаотических процессов, отражающих динамику котировок валютных инструментов, на визуальном уровне подтверждает предположение о наличии локальных участков с явно выраженными трендами, допускающими полиномиальное описание невысокого порядка. Иными словами, имеет место некоторый аналог инерционности. В случае математического подтверждения этого факта, можно будет сделать вывод о локальном снижении степени хаотичности исследуемого процесса, что открывает перспективы в построении эффективных торговых стратегий.

Наличие участков, сохраняющих общую направленность развития процесса, дает возможность использовать традиционные алгоритмы статистического описания таких участков. Если данное предположение окажется некорректным, то получить эффективные управляющие стратегии на основе анализа трендов не удастся.

В качестве типичного процесса с нестационарной динамикой рассмотрим изменения котировок валютных пар на электронном рынке FOREX. Для изучения поставленного вопроса в настоящей работе проведен ряд вычислительных экспериментов для наиболее часто используемых валютных инструментов.

**2. Математическое описание вычислительного эксперимента.** Разделим область изменения исследуемого процесса  $Y(t)$  на равномерные сектора размера  $dL$ . Значения процесса измеряются в унифицированных величинах, называемых *пунктами* ( $n$ ). Предположим, что процесс перешел с уровня  $L_k$  до вышерасположенного уровня  $L_{k+1}$ . Данный факт можно грубо интерпретировать как наличие положительного тренда. Обозначим такой переход  $L_k \rightarrow L_{k+1}$ . И наоборот, переход  $L_k \rightarrow L_{k-1}$  можно рассматривать на динамику с отрицательным трендом.

Вопрос состоит в подтверждении гипотезы инерционности процесса  $Y(t)$ , определяемой достижением последующего уровня в направлении, соответствующем установленному тренду.

Будем оценивать вероятность положительных исходов, то есть перехода процесса  $L_k \rightarrow L_{k+1}$  после того, как он осуществил переход  $L_{k-1} \rightarrow L_k$ . Отрицательным исходом будет обратный переход на нижестоящий уровень  $L_k \rightarrow L_{k-1}$  сразу после ранее осуществленного возрастающего перехода  $L_{k-1} \rightarrow L_k$ . В силу симметрии аналогичные оценки исходов имеют место и для убывающего перехода. Таким образом, полная группа событий состоит из двух положительных исходов:

$$(L_k \rightarrow L_{k+1} \mid L_{k-1} \rightarrow L_k), (L_k \rightarrow L_{k-1} \mid L_{k+1} \rightarrow L_k),$$

и двух отрицательных

$$(L_k \rightarrow L_{k-1} \mid L_{k-1} \rightarrow L_k), (L_k \rightarrow L_{k+1} \mid L_{k+1} \rightarrow L_k).$$

В качестве иллюстрации на рисунке 1 приведен пример динамики котировки валютного инструмента EURUSD на 10-дневном интервале наблюдения с границами зон сегментации и отметками о пересечении соответствующих границ.



Рис. 1. Пример динамики котировки валютного инструмента EURUSD на 10-дневном интервале наблюдения

Заметим, что на графике представлен как сам процесс  $Y(t)$ , так и его сглаженная версия  $Y_s(t)$ . Сглаживание осуществлялось простым экспоненциальным фильтром  $Y_s(t) = \alpha Y(t) + \beta Y_s(t-1)$ ,  $\beta = 1 - \alpha$ ,  $\alpha = 0.02$ .

Примеры реализации положительных исходов приведены на рисунках 2-3, а отрицательных – на рисунках 4-5.

Предположим, что проведено  $N$  экспериментов, в каждом из которых зафиксирован тренд, как направление перехода с одного уровня на другой. В случае, если направление движения сохранится вплоть до пересечения со следующим по направлению тренда уровнем, то такой исход будем воспринимать как событие, подтверждающее наличие тренда. Наоборот, если процесс развернется и достигнет предшествующего уровня, то такой исход следует рассматривать как негативный, отрицающий наличие тренда. Предположим, что в результате  $N$  последовательно проведенных экспериментов,  $M$  исходов подтверждают гипотезу о наличии тренда, а  $N - M$  исходов ее отрицают.

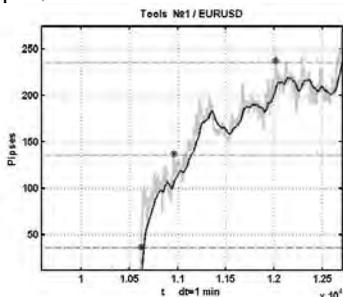


Рис. 2. Пример реализации положительного исхода

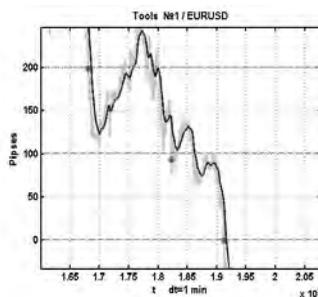


Рис. 3. Пример реализации положительного исхода

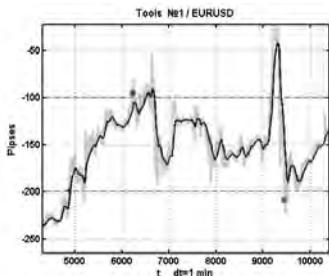


Рис. 4. Пример реализации отрицательного исхода

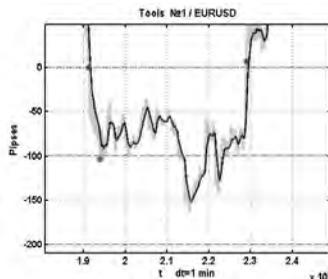


Рис. 5. Пример реализации отрицательного исхода

Тогда предположение о наличии тренда может трактоваться как альтернатива  $H_1 : p \neq p_0 = 0.5$  к нулевой гипотезе  $H_0 : p = p_0 = 0.5$  об его отсутствии.

**Вычислительный эксперимент 1.** Для того чтобы охватить как можно больше типов вариаций хаотической динамики, встречающиеся на электронном рынке, рассматривались пять 100-дневных участков для трех наиболее часто применяемых валютных инструментов – *EURUSD*, *EURJPY* и *USDJPY*. В качестве размера межуровневого интервала использовалась величина  $dL = 100$  пунктов.

Оценка вероятности, как обычно, осуществляется через частоту положительных исходов, то есть через отношение положительных исходов к общему числу экспериментов. Соответствующие результаты вычислительного эксперимента представлены в таблице 1.

Из приведенной таблицы наглядно видно полное отсутствие какой-либо инерционности в динамике котировок. Последнее утверждение можно проверить методами статистической проверки гипотез. Как указывалось выше, проверяется нулевая гипотеза  $H_0 : p = 0.5$  против альтернативы  $H_1 : p \neq p_0$ .

Таблица 1. Частота положительных исходов при  $dL = 100$

Временной интервал, сутки	Валютные инструменты		
	EURUSD	EURJPY	USDJPY
1-100	0.552	0.484	0.444
101-200	0.507	0.536	0.465
201-300	0.533	0.552	0.560
301-400	0.494	0.452	0.465
401-500	0.446	0.545	0.444

В качестве примера, рассмотрим эксперимент для 100-дневного интервала наблюдений за котировками валютного инструмента EURUSD. В результате эксперимента получили  $n=76$  закрытий позиции, из которых  $m=42$  отвечали условию инерционности при  $dL=100$ п. Относительная частота  $\frac{m}{n}=0,552$  соответствует значению решающей статистики:

$$U = \frac{\left(\frac{m}{n} - p_0\right)\sqrt{n}}{\sqrt{p_0q_0}} = \frac{0,052\sqrt{76}}{\sqrt{0,25}} = 0,91.$$

Здесь  $q_0 = 1 - p_0$ ,  $U \in N(0, 1)$ , т.е. подчинена стандартному гауссовскому распределению с параметрами  $(0, 1)$ . Предположение о нормальном распределении критерия следует из теоремы Лапласа (при достаточно большом  $n$  относительную частоту можно приближенно считать нормально распределенной с математическим ожиданием  $p$  и средним квадратическим отклонением  $\sqrt{\frac{pq}{n}}$ ). В общем случае предположение о нормальности требует дополнительной проверки.

Критическая область для симметричной конкурирующей гипотезы  $H_1 : p \neq p_0$  определяется на основе выбранного уровня значимости  $\alpha$ . Для двухсторонней критической области  $u_{кр}$  определяется по таблице значений функции Лапласа из условия:

$$\Phi(u_{кр}) = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2} = \frac{1-\alpha}{2} = 0,005, \text{ где } \alpha = 0,99.$$

Из таблиц распределения функции Лапласа определяем  $u_{кр} = 2,85$ . Следовательно, расчетное значение статистики  $U = 0,91$  принадлежит области принятия гипотезы  $H_0$ .

**Вычислительный эксперимент 2.** Решение об отсутствии инерционности в предыдущем эксперименте может быть обусловлено излишне большим интервалом подтверждения  $dL=100$  п. Проверим, можно ли рассчитывать на наличие инерционности для меньших уровней сегментации.

**Замечание.** Следует иметь ввиду, что исследуемый процесс обладает существенной чисто случайной составляющей. Если рассматривать случайный разброс значений относительно сглаженного про-

цесса с  $Y_s(t)$  с  $\alpha=0.02$ , то его среднеквадратическое отклонение (ско) на 100 дневных участках наблюдения для разных валютных инструментов колеблется в диапазоне 11-14п. При уменьшении  $\alpha$  до 0.01, соответствующее ско будет изменяться в пределах 15-20п., что связано с меньшей степенью сглаженности и, следовательно, меньшей разностью между исходным и сглаженными процессами.

Величина разброса отвечает за случайные решения, не отвечающие системным процессам динамики котировок, и, следовательно, искажают выводы об инерционности исследуемой динамики. Таким образом, для получения корректного вывода о наличии инерционной составляющей величина шага сегментации (системной динамики) должна заметно превышать случайную составляющую.

В качестве примера с допустимо минимальным шагом сегментации для приведенных значений ско, рассмотрим ту же задачу с  $dL = 50$  п. Частоты положительных исходов, подтверждающих инерционности процесса, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Частота положительных исходов при  $dL = 50$

Временной интервал, сутки	Валютные инструменты		
	EURUSD	EURJPY	USDJPY
1-100	0.539	0.568	0.522
101-200	0.524	0.528	0.497
201-300	0.529	0.503	0.537
301-400	0.503	0.550	0.534
401-500	0.493	0.548	0.552

Полученные результаты, как и в предыдущем случае, подтверждают отсутствие инерционности. Незначительная положительная асимметрия слишком мала, чтобы принять нулевую гипотезу о значимости отличия частоты положительного исхода от 50%.

**Вычислительный эксперимент 3.** Отличие от первого эксперимента состоит в том, что фиксация начала каждого этапа динамики процесса осуществляется при пересечении уровня сегментации не самим процессом, а его сглаженной версией. Закрытие позиции (т.е. установка факта признания или не признания инерционности в каждом опыте) осуществляется самим процессом  $Y(t)$ .

Очевидно, что чем выше степень сглаженности, тем в меньшей степени получаемый результат будет зависеть от случайных пересечений уровней флуктуационной составляющей процесса. С другой стороны, более высокая степень сглаженности неизбежно приводит к за-

держке сглаженного процесса относительно исходного, вызывающей искажения результирующих оценок. В качестве компромисса будем использовать значения  $\alpha = 0.005 - 0.02$ . Шаг сегментации, как и в первом эксперименте, равен 100п.

Результаты оценки вероятности положительного исхода, подтверждающего альтернативу  $H_1$ , для пяти стодневных интервалов наблюдения и различных значениях коэффициента передачи  $\alpha$  экспоненциального фильтра представлены в таблице 3.

Из приведенных данных видно, что сглаженная версия процесса изменения котировок обладает большей инерционностью, что позволяет, в принципе, выработать полезные рекомендации при построении торговой стратегии.

Однако следует иметь в виду, что отрицательные решения являются более сильными в смысле проигрыша, поскольку в этом случае осуществляется разворот динамики котировки, а уход процесса  $Y(t)$  за время, когда сглаженная кривая  $Y_s(t)$  пересечет уровень открытия, может быть весьма велик.

Таблица 3. Частота положительных исходов при открытии позиции сглаженной траекторией котировки

Временной интервал, сутки	EURUSD		
	$\alpha = 0.005$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.02$
1-100	0.667	0.681	0.618
101-200	0.771	0.791	0.667
201-300	0.606	0.706	0.612
301-400	0.612	0.653	0.618
401-500	0.648	0.581	0.574

**Замечание.** Возможны сбои в переобозначении уровней, если при прохождении  $Y_s(t)$  уровня открытия, сам процесс  $Y(t)$  выйдет за пределы  $|dL|$ , т.е. окажется выше зоны  $LUr$  или ниже  $LDn$ . Тогда для закрытия позиции ему нужно вернуться и снова пересечь соответствующую границу, что может произойти очень нескоро и открыться в неверном с точки зрения инерционности направлении.

**Вычислительный эксперимент 4.** Условия аналогичны эксперименту 3, но закрытие и открытие опыта, осуществляется сглаженным процессом  $Y_s(t)$  при пересечении соответствующего уровня. Результаты эксперимента приведены в таблице 4.

Таблица 4. Частота положительных исходов при открытии и закрытии позиции  
сглаженной траекторией котировки

Временной интервал, сутки	EURUSD		
	$\alpha = 0.005$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.02$
1-100	0.652	0.652	0.593
101-200	0.698	0.706	0.696
201-300	0.686	0.707	0.688
301-400	0.612	0.612	0.582
401-500	0.567	0.534	0.574

Нетрудно видеть, что представленные результаты достаточно близки к соответствующим оценкам, приведенным в таблице 3. Иными словами, фиксация результата сглаженной кривой не ухудшила окончательного результата. Это связано с тем, что вероятность достижения уровня фиксации процессом  $Y(t)$  будет выше как при положительном, так и при отрицательном исходе.

**Закключение.** Вопрос инерционности квазихаотических процессов с нестационарной случайной составляющей является ключевым с точки зрения решения ряда важных прикладных задач управления. Примером может служить задача построения эффективных торговых стратегий на основе анализа трендов.

Применение сегментации области изменения изучаемого случайного процесса позволяет построить наглядную, хорошо визуализируемую систему анализа его инерционности.

Использование самого исследуемого процесса для фиксации уровней подтверждения или отрицания его инерционности не позволяет решить поставленную задачу в силу высокой степени его стохастического разброса. Процесс достигает уровней принятия решения чаще в силу высокой дисперсии, чем в результате инерционного тренда. Отсюда возникает рекомендация об использовании для анализа инерционности сглаженного процесса. В частности, хорошие результаты дает сглаживание экспоненциальным фильтром с коэффициентом передачи  $\alpha = 0.005 - 0.01$ .

Применение сглаженной кривой для анализа инерционности приводит к диапазону значений отношений частоты достижения уровня, подтверждающего наличие инерционности, к частоте событий, отрицающей данную гипотезу, равному 0,6-0,7. В этом случае гипотеза о наличии инерционности нестационарного процесса не отвергается.

Это означает, что имеющиеся экспериментальные данные подтверждают наличие принципиальной возможности использования трендовой динамики для построения краткосрочного прогноза. Вопрос

о целесообразности использования такой методологии со столь незначительным перевесом положительного решения, необходимо решать из конкретной задачи и методики анализа рисков.

Приведенное исследование является не полным. В частности, не исследован вопрос анализа инерционности для различных диапазонов сегментации  $dL$ , используемых для установления наличия и направления инерционной динамики. Другим важным вопросом, является скорость прохождения уровня, на котором определяется тренд. Данный вопрос целесообразно проводить на существенно переработанной программе, не использующей сегментацию диапазона изменения процесса, а осуществляющего прямой отсчет в произвольный момент времени. В этой ситуации возможно использование более мощных критериев установления значимого тренда. Эти вопросы предполагается осветить в статьях в последующих выпусках настоящего сборника.

### Литература

1. *Lorenz E.N.* Deterministic non-periodic flow // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963. vol. 20 (2). pp. 130–141.
2. *Peters E. E.* Chaos and order in the capital markets: a new view of cycles, prices, and market volatility (2nd ed.) // NY: John Wiley & Sons. 1996. 288 p.

### References

1. Lorenz E.N. Deterministic non-periodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963. vol. 20 (2). pp. 130–141.
2. Peters E. E. Chaos and order in the capital markets: a new view of cycles, prices, and market volatility (2nd ed.). NY: John Wiley & Sons, 1996. 288 p.

**Мусаев Александр Азерович** — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИРАН, декан факультета информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного университета, научный консультант ОАО Специализированная инжиниринговая компания «Севзапмонтажавтоматика». Область научных интересов: анализ данных, управление и прогнозирование в сложных динамических системах, стохастические и хаотические системы. Число научных публикаций — 214. amusaev@technolog.edu.ru.com, www.szma.com; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; п.т. +7(812)350-5885, факс +7 (812)350-1113.

**Musaev Alexander Azerovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, leading researcher, Laboratory of IT in System Analysis and Modeling, SPIIRAS, dean of IT and control systems department, St. Petersburg State Institute of Technology, expert, public corporation Specialized Engineering Company "Sevzapmontageautomatica". Research interests: data analysis, complicated dynamic processes prognosis and control, stochastic chaos systems. The number of publications — 214. amusaev@szma.com, www.szma.com; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)350-5885, fax +7(812)350-1113.

## РЕФЕРАТ

### *Мусаев А.А.* **Численный анализ инерционности хаотических процессов.**

Рассмотрен фундаментальный вопрос о наличии инерционности информационных процессов, находящихся под воздействием неопределенного числа разнородных нестационарных факторов. Решение указанной проблемы играет принципиальную роль в ряде задач, связанных с построением и применением управляющих стратегий. Примером может служить задача построения эффективных торговых стратегий на основе анализа трендов.

Применение сегментации области изменения изучаемого хаотического процесса позволяет построить наглядную, хорошо визуализируемую систему анализа его инерционности.

Использование самого исследуемого процесса для фиксации уровней подтверждения или отрицания его инерционности не позволяет решить поставленную задачу в силу высокой степени его стохастического разброса. Процесс достигает уровней принятия решения чаще в силу высокой дисперсии, чем в результате инерционного тренда. Отсюда возникает рекомендация об использовании для анализа инерционности сглаженного процесса. В частности, хорошие результаты дает сглаживание экспоненциальным фильтром с коэффициентом передачи 0.005-0.01.

В качестве показателя инерционности используем отношение числа опытов, подтверждающего наличие инерционности, к общему числу экспериментов. Применение сглаженной кривой для анализа инерционности позволяет получить значение указанного показателя в пределах 0.6-0.7. В этом случае гипотеза о наличии инерционности нестационарного процесса не отвергается. Это означает, что имеющиеся экспериментальные данные подтверждают наличие принципиальной возможности использования сглаженной трендовой динамики для построения краткосрочного прогноза. Вопрос о целесообразности использования такой методологии со столь незначительным перевесом положительного решения, необходимо решать из конкретной задачи и методики анализа рисков.

Приведенное исследование не является полным. В частности, не исследован вопрос анализа инерционности для различных диапазонов сегментации, используемых для установления наличия и направления инерционной динамики. Другим важным вопросом, является скорость прохождения уровня, на котором определяется тренд. Данный вопрос целесообразно проводить на существенно переработанной программе, не использующей сегментацию диапазона изменения процесса, а осуществляющего прямой отсчет в произвольный момент времени. В этой ситуации возможно использование более мощных критериев установления значимого тренда. Эти вопросы предполагается осветить в последующих выпусках настоящего сборника.

## SUMMARY

### *Musaev A.A.* **Numerical Analysis of Chaotic Processes Persistence.**

The fundamental problem of existence of a persistence effect of the information processes under the influence of uncertain number of diverse non-stationary factors is considered. The solution of the specified problem is important part in a number of the tasks connected with construction and application of operating control strategy. The problem of creation of effective trade strategy on the basis of the analysis of trends can be an example.

Segmentation of studied chaotic process change area allows to construct evident, well visualized system of persistence effect analysis.

The direct use of the studied process for fixing levels persistence confirmation doesn't allow solving an objective because of a high degree of its stochastic dispersion. Process reaches levels of decision-making more often owing to high dispersion, than as a result of an inertial trend. From there is a recommendation about use for the analysis of a persistence effect of smoothed process. In particulars, good results yields smoothing by the exponential filter with transfer coefficient in the range 0.005-0.01.

As an index of a persistence effect we use the relation of number of the experiences confirming existence of a lag, to total number of experiments. Application of the smoothed curve for the inertia analysis allows to receive value of the specified index within 0.6-0.7. In this case the hypothesis of existence of a chaotic process persistence effect isn't rejected. It means that available experimental data confirm a basic possibility of smoothed trend dynamics use for creation of the short-term forecast. Application of such methodology with so insignificant positive decision overweight is necessary to solve from a specific objective and a risk analysis technique.

The given research is not full. In particular, the question of the inertia analysis for various ranges of segmentation isn't investigated. Other important question is the speed of level passing. It is expedient to carry out the matter on significantly processed program which isn't using range segmentation of process, and carrying out direct counting to any timepoint. In this situation is possible using of stronger criteria of significant trend detection. These questions are supposed to be taken up in the subsequent releases of this collection.

М.Б. ИГНАТЬЕВ, Т.С. КАТЕРМИНА  
**МЕТОД ИЗБЫТОЧНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И  
КОРРЕКЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕАЛЬНОМ  
ВРЕМЕНИ. ЧАСТЬ 2.**

---

*Игнатьев М.Б., Катермина Т.С. Метод избыточных переменных для контроля и коррекции вычислительных процессов в реальном времени. Часть 2.*

**Аннотация.** Рассматривается метод избыточных переменных для контроля и коррекции вычислительных процессов в реальном времени, что необходимо для повышения надежности вычислительных процессов. Рассматриваются вопросы эквивалентности исходных и расширенных систем, повышения помехоустойчивости, коррекции вперед. Приводится сравнение метода избыточных переменных с другими известными методами контроля, диагностики и коррекции вычислительных систем.

**Ключевые слова:** точность и надежность вычислений, метод избыточных переменных, системы с обратной связью, вычислительные процессы, контроль, коррекция.

*Ignatyev M.B., Katermina T.S. The redundant variables method for checking and correction of computing processes in real time. Part 2.*

**Abstract.** The redundant variables method for checking and correction of computing processes in real time is considered, that is necessary for increasing of the computing processes reliability. The questions of equivalence of the initial and extended systems, improve immunity, correction ahead are considered. The redundant variables method is compared with other known methods of control, diagnosis and correction of computer systems.

**Keywords:** accuracy and reliability of computing, redundant variables method, feedback, computing processes, checking, correction.

---

**1. Введение.** В данной статье продолжается рассмотрение метода избыточных переменных для контроля и коррекции вычислительных систем [3], на которые возлагается решение все более ответственных задач.

Суть метода заключается в том, чтобы заменить исходные переменные системы новыми, избыточными и эти новые переменные связать каким-либо контрольным соотношением, по выполнению или невыполнению которого можно судить, насколько точно работает система и каким образом ее нужно корректировать. Более подробно суть метода описана в работах [2, 3, 5]. Схема вычислительного процесса при использовании МИП изображена на рисунке 1.

В вычислительном устройстве ВУ решается расширенная система уравнений, в контрольном органе КО вычисляется контрольное условие, в устройстве сжатия решаются уравнения перехода от избыточных переменных к первоначальным. Сигнал ошибки, полученный на выходе контрольного органа, используется для коррекции вычислительного процесса с помощью обратной связи (пунктирная линия I на

рисунке 1) или с помощью коррекции вперед (пунктирная линия II на рисунке 1).

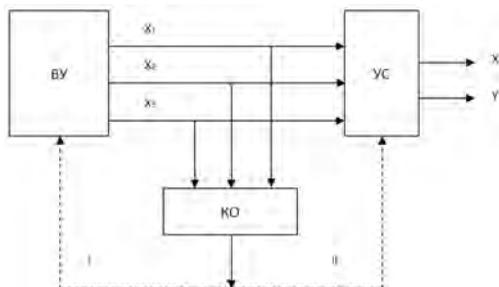


Рис. 1. Схема вычислительного процесса с коррекцией

## 2. Об эквивалентности исходной и расширенной систем.

Всякое увеличение надежности, точности или быстродействия связано с эквивалентными преобразованиями исходных уравнений, алгоритмов, схем. При построении расширенных структур по методу избыточных переменных будем исследовать эквивалентность между исходными уравнениями и уравнениями, полученными после сжатия расширенной системы. При этом вычислительный процесс будем полагать идеальным и рассмотрение будем вести в отсутствии помех. Два множества  $M$  и  $N$  называются эквивалентными, если между их элементами можно установить взаимнооднозначное соответствие. В нашем случае множество  $M$  — это множество решений исходных уравнений, множество  $N$  — это множество решений, полученных после применения операции сжатия к решениям расширенных систем уравнений. Относительно исходных уравнений будем предполагать, что решение исходной системы существует и единственно в заданной области изменения переменных. Из доказательства теоремы о существовании и единственности следует, что для каждого из решений  $y_i$  существует ряд, сходимость которого доказывается с помощью оценок сверху. Сравнивая соответствующие решениям ряды, доказывается взаимнооднозначное соответствие множеств  $M$  и  $N$ . При линейном расширении с постоянными коэффициентами доказывается эквивалентность исходной и расширенной систем. Эквивалентность нелинейного расширения подробно рассмотрена в работе [2].

**3. О помехоустойчивости расширенных систем.** Будем различать ошибки первичные и вторичные. Первичные ошибки определяются нарушением начальных условий и функциями помех  $A_j$  в пра-

вых частях решаемых уравнений. Эти ошибки являются причиной появления вторичных ошибок  $\tilde{x}_j - x_j = e_j$ , где  $\tilde{x}_j$  — переменные, вычисляемые в реальной системе под действием помех,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Линейные контрольные условия в виде первых сигналов системы:

$$\frac{dx_j}{dt} = f_j(x_1, x_2, \dots, x_{n_1}, t), \quad x_j(0) = x_{j0}, \quad j = 1, 2, \dots, n_1 \quad (1)$$

позволяют выявлять лишь первичные ошибки [2]. При непрерывной зависимости решений от параметров уменьшение первичных ошибок ведет к уменьшению ошибок вторичных.

1. Рассмотрим систему с одним линейным контрольным условием:

$$\sum_{j=1}^{n_1} m_j^1 x_j = 0, \quad m_j^1 = const. \quad (2)$$

Это условие выполняется для системы (7). При действии помех:

$$\tilde{x}_j = \tilde{x}_{j0} + \int_{t_0}^t f_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{n_1}, t) dt + \int_{t_0}^t A_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{n_1}, t) dt$$

контрольное условие будет нарушено:

$$\Delta_1 = \sum_{j=1}^{n_1} m_j^1 \tilde{x}_{j0} + \sum_{j=1}^{n_1} m_j^1 \int_{t_0}^t A_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{n_1}, t) dt.$$

Исследования экстремальных свойств величины  $\Delta_1$  показали [2], что она будет иметь экстремум при  $\cos \alpha_j^1 = \cos \beta_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n_1$ , при условии, что  $\sum (m_j^1)^2 = const$ ,  $\sum (h_j)^2 = const$ , где  $\cos \alpha_j^1 = \frac{m_j^1}{\sqrt{\sum (m_j^1)^2}}$ ,  $\cos \beta_j = \frac{h_j}{\sqrt{\sum h_j^2}}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n_1$ ,  $h_j = \int_{t_0}^t A_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{n_1}, t) dt$ .

Это экстремальное свойство сигнала ошибки может быть использовано при определении ориентации контрольной плоскости.

Разложение суммарного вектора помехи  $H_0$ , на два вектора —  $H_N$ , перпендикулярный плоскости (2), и вектор  $H_R$ , параллельный этой плоскости, показывает, что с помощью линейного контрольного условия обнаруживаются составляющие помех, перпендикулярные контрольной плоскости. Более того, можно определить каждую из составляющих  $H_{N_j}$  [2].

Определить составляющие  $H_{R_j}$  при неподвижной контрольной плоскости не возможно. Найденные величины  $H_{N_j}$  могут быть использованы при коррекции вперед [2].

Для любого числа « $k$ » ортогональных контрольных плоскостей при наилучшем расположении плоскостей и вектора помехи выполняется соотношение:  $\left(\sum_{l=1}^k \Delta_l^2\right)_{\text{опт}} = \sum_{j=1}^{n_1} m_j^2 \sum_{j=1}^{n_1} h_j^2$  [2].

Знание этой экстремальной величины позволяет назначить критерий для оценки эффективности контроля как отношение:

$$\eta = \frac{\sum_{l=1}^k \Delta_l^2}{\left(\sum_{l=1}^k \Delta_l^2\right)_{\text{опт}}}, \quad (3)$$

при условии  $\sum_{j=1}^{n_1} \cos^2 \alpha'_j = 1, \dots, \sum_{j=1}^{n_1} \cos^2 \alpha^k_j = 1,$   
 $\sum_{j=1}^{n_1} \cos^2 \beta_j = 1, \sum_{j=1}^{n_1} \cos \alpha'_j \cos \alpha''_j = 0, \dots, \sum_{j=1}^{n_1} \cos \alpha'_j \cos \alpha^k_j = 0, \dots,$   
 $\sum_{j=1}^{n_1} \cos \alpha^{k-1}_j \cos \alpha^k_j = 0.$

В формуле (3) величина  $\eta$  может изменяться от нуля до единицы. По этой формуле можно оценить при определенных гипотезах о помехах эффективность выбранной схемы контроля по отношению к наилучшему случаю расположения контрольных плоскостей и помех.

2. Удобным является вариант, когда исходная задача остается неизменной, а введение избыточности сводится к составлению вспомогательной задачи, выходные переменные которой являются линейными комбинациями переменных основной задачи.

Если исходная задача имеет вид  $\frac{dy_i}{dt} = f_i(y_1, y_2, \dots, y_n, t),$

$y_i(0) = y_{i0}$ , то при диагональной матрице расширения, когда  $y_i = x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , а остальные новые переменные определяются из контрольных условий, например, для одного контрольного условия  $\sum_{j=1}^{n+1} m_j x_j = 0$ ,  $x_{n+1} = -\frac{1}{m_{n+1}} \sum_{j=1}^n m_j y_j$ , эта вспомогательная задача будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_{n+1}}{dt} &= -\frac{1}{m_{n+1}} \sum_{j=1}^n m_j f_j(y_1, y_2, \dots, y_n, t), \\ x_{n+1}(0) &= -\frac{1}{m_{n+1}} \sum_{j=1}^n m_j y_{j0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Важная характеристика системы контроля — объем дополнительного оборудования. Из уравнения (4) следует, что для линейных задач при линейном контроле относительное увеличение объема оборудования составляет  $1/n$ . Для нелинейных задач это увеличение обычно значительно больше и может достигать удвоения.

Другая важная характеристика — надежность устройства контроля. Если контролируемая и контролирующая схемы состоят из элементов одинаковой надежности, то условная вероятность отказа схемы контроля  $P_0$  определяется отношением соответствующих объемов оборудования:

$$P_0 = \frac{\Delta N}{N + \Delta N},$$

$N$  — объем оборудования для реализации исходной задачи,  $\Delta N$  — объем оборудования для решения вспомогательной задачи. Для линейных задач  $P_0 \approx 1/N$ , т.е. достаточно мала. Для тех задач, где избыточность сравнима с удвоением, вероятность  $P_0$  становится  $\approx 0.5$ . Уменьшить ее можно за счет использования в устройстве контроля более надежной аппаратуры.

Следующая важная характеристика — достоверность контроля. Можно указать три основные причины, приводящие к появлению неправильного контрольного сигнала. Одна из них — неправильность системы контроля. Вторая причина — наличие ошибок принципиаль-

но не обнаруживаемых контрольным устройством. К ним относятся все ошибки  $h_j$ , удовлетворяющие уравнению  $\Delta = \sum_{j=1}^{n+k} m_j h_j = 0$ .

Проведенные расчеты показывают [2], что доля неконтролируемых ошибок убывает как при возрастании их кратности, так и при увеличении числа различных состояний переменных.

Третья причина недостоверного контроля связана с наличием зоны нечувствительности, с ограниченной точностью вычислений. Задача контроля — обнаружение факта превышения сигналом ошибки  $\Delta$  в контрольных условиях допустимого предела  $\pm \Delta_{\text{доп}}$ . Вследствие конечной ширины допустимого интервала, в котором может изменяться  $\Delta$ , среди грубых ошибок, превышающих допуск  $|\Delta x_j| > \sigma$ , будут и необнаруживаемые контролем [2].

Ограничиваясь однократными ошибками ( $r = 1$ ) как наиболее вероятными, рассмотрим вопросы чувствительности контроля и методы ее повышения. Чувствительность контрольного условия к ошибкам по переменной  $x_j$  можно вычислить по формуле:

$$\rho_j = \frac{|m_j|}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n+k} m_j^2}}$$

Если имеем несколько контрольных условий:

$$\Delta_1 = \sum_{j=1}^{n+k} m_j^1 \tilde{x}_j, \dots, \Delta_k = \sum_{j=1}^{n+k} m_j^k \tilde{x}_j, \quad (5)$$

то для обнаружения любой ошибки достаточно, чтобы хотя бы одно из рассогласований вышло за допустимые пределы. Поэтому чувствительность системы (5) к ошибкам по  $j$ -ой переменной  $\rho_j$  определится как максимальная из чувствительностей контрольных условий к этой переменной  $\rho_j = \max_{1 < g < k} \rho_j^g$ .

3. Важно определить место ошибки, ее величину, то есть решить задачу технической диагностики. Если имеем контрольные условия (11), то для диагностики необходимо так назначить коэффициенты этих условий, чтобы пространство рассогласований  $V_k$  разбивалось

таким образом, чтобы факт попадания точки  $(\Delta_1 \dots \Delta_k)$  в ту или иную область соответствовал определенному виду ошибок. В частности для диагностики одиночных ошибок пространство  $V_k$  надо разбить на  $n_1$  областей, одиночных и двойных ошибок — на  $n_1 + C_{n_1}^2$  областей и т.д.

Например, если для расширенной системы из четырех переменных контрольные условия:

$$\begin{aligned} m_1^1 h_1 + m_2^1 h_2 + m_3^1 h_3 + m_4^1 h_4 &= \Delta_1, \\ m_1^2 h_1 + m_2^2 h_2 + m_3^2 h_3 + m_4^2 h_4 &= \Delta_2, \end{aligned}$$

то для определения места неисправности с точностью до переменной матрицу коэффициентов можно взять в виде:

$$\left\| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 \end{array} \right\|.$$

Действительно, если  $\Delta_1 \neq 0$ ,  $\Delta_2 \neq 0$ , то действует  $h_1$ ; если  $\Delta_1 \neq 0$ ,  $\Delta_2 = 0$ , то действует  $h_2$ ; если  $\Delta_1 = 0$ ,  $\Delta_2 \neq 0$ , то действует  $h_3$ ; если  $\Delta_1 \neq 0$ ,  $\Delta_2 \neq 0$ ,  $sign \Delta_1 \neq sign \Delta_2$  sign, то действует  $h_4$ .

Можно пойти другим путем и назначить  $m_j^1$  и  $m_j^2$  так, чтобы  $\frac{m_j^1}{m_j^2} \neq \frac{m_i^1}{m_i^2}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n_1$ ,  $i \neq j$ , и тогда определять номер первичной ошибки  $h_j$  по уравнению:

$$m_j^2 \Delta_1 - m_j^1 \Delta_2 = \Delta,$$

которое будет равно нулю именно для данного номера  $j$ .

В данном случае по отношению контрольных сумм можно определить номер первичной ошибки  $\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = j$ .

При этом можно определить не только код ошибки, но и ее величину  $h_j = \frac{\Delta_1}{m_j^1} = \frac{\Delta_2}{m_j^2}$ .

Для диагностики ошибок кратности  $r$  необходимо  $r+1$  контрольное уравнение.

Результаты диагностики могут быть использованы для коррекции. Определив с помощью диагностической процедуры  $h_j$  можно к полученному решению добавить корректирующий сигнал, равный  $(-h_j)$  и тем самым уменьшить влияние первичной ошибки.

Но следует заметить, что если интервал времени  $(t-t_0)$  большой, то вторичные ошибки, вызванные действием первичных ошибок, могут достичь большой величины. Поэтому очень важно обнаруживать и устранять саму первичную ошибку  $A_j$ , а не интеграл от нее, каковым является  $h_j$ .

4. Если имеем избыточную систему с  $(n+1)$  переменными и одним линейным условием, то повторив решение этой системы  $(n+1)$  раз каждый раз с новыми коэффициентами контрольной плоскости, можно получить довольно полную информацию о всех первичных ошибках, действующих на конкретную задачу, решаемую на конкретной аппаратуре каким-то конкретным методом. При этом предполагается, что ошибки не изменяются при изменении коэффициентов контрольного условия.

Например, если имеем систему с  $j = 1, 2, 3$ ,

$$\frac{d\tilde{x}_j}{dt} = f_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, t) + A_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, t),$$

то на выходе контрольного органа получим:

$$\Delta = \sum_{j=1}^3 m_j h_j. \quad (6)$$

Для того чтобы определить  $h_j$ , необходимо в данном случае иметь три уравнения вида (6):

$$\Delta_1 = m_1' h_1 + m_2' h_2 + m_3' h_3 \quad (7)$$

$$\Delta_2 = m_1'' h_1 + m_2'' h_2 + m_3'' h_3$$

$$\Delta_3 = m_1''' h_1 + m_2''' h_2 + m_3''' h_3,$$

откуда можно определить  $h_j$  при условии:

$$\begin{vmatrix} m_1' & m_2' & m_3' \\ m_1'' & m_2'' & m_3'' \\ m_1''' & m_2''' & m_3''' \end{vmatrix} \neq 0.$$

При повороте плоскости часть помех будет поворачиваться вместе с плоскостью ней. Для того чтобы определить, какая доля помех поворачивается, можно взять еще одну контрольную плоскость  $\Delta_4 = \sum m_j^* x_j$ ,  $j=1,2,3$ , экспериментально получить величину  $\Delta_{4П}$  и сравнить расчетное ( $\Delta_{4Т}$ ) и экспериментальное значение этих величин. Если между ними большая разница, то таким способом пользоваться нельзя.

Полученные в результате экспериментов и расчетов по формуле (13) величины  $h_j$  для нужных моментов времени могут быть использованы для коррекции решения, соответствующего этим моментам времени  $x_j^*(t_1) = \tilde{x}_j(t_1) - h_j(t_1)$ , где  $t_1$  любое в интервале  $(t - t_0)$ . В результате экспериментов с поворачивающейся плоскостью определяется направление вектора помех, и эта информация может быть использована как при организации непрерывной обратной связи, так и при построении алгебраической коррекции [2].

Если число контрольных плоскостей  $k$ , то число необходимых поворотов  $(n+k)/k$ , минимальное число поворотов будет при  $k \approx n$ , оно равно двум при  $k \approx 3/2$ . Таким образом, здесь возможен обмен между затратами аппаратуры и затратами времени для определения вектора помех. Чем больше контрольных плоскостей, то есть чем больше избыточность аппаратуры, тем меньше раз требуется повернуть пучок плоскостей, тем меньше затраты времени.

5. Система с поворачивающейся контрольной плоскостью по существу является системой с нелинейным контрольным условием, которое изменяется в дискретные моменты времени — в моменты между окончанием и началом решений в процессе периодизации.

Сигнал ошибки на выходе контрольного органа будет сложной функцией от переменных  $x_j$ , первичных и вторичных ошибок [2].

Таким образом, нелинейный контроль позволяет обнаруживать как первичные, так и вторичные ошибки. Но этот вид контроля теснее связан с видом исходного уравнения, чем линейный контроль, что является в одних случаях — достоинством, когда требуется выявлять и вторичные ошибки, в других случаях — недостатком, так как в этом случае затруднено выявление первичных ошибок в чистом виде.

На рисунке 2 видно, что линейная контрольная плоскость ( $\epsilon$  — зона нечувствительности) не позволяет обнаруживать составляющую  $H_R$  вектора помехи, параллельную плоскости (рис. 2-а), а нелинейное контрольное условие вследствие конечности радиуса кривизны позволяет обнаруживать и эту составляющую (рис. 2-б). При этом выявительные свойства нелинейного контроля определяются как величиной зоны нечувствительности контрольного органа, так и радиусом кривизны в точке контроля. Чем он меньше, тем с большей достоверностью обнаруживаются все составляющие вектора помехи.

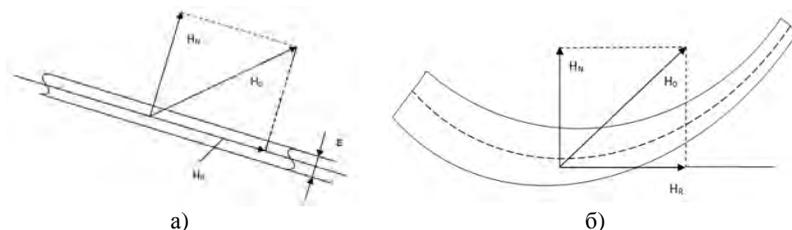


Рис. 2. Выявительные свойства: а) линейного и б) нелинейного контроля

6. Естественно после рассмотрения вопросов о контроле и диагностике обратиться к использованию полученных сведений для исправления результатов вычислений. Один из видов коррекции — коррекция вперед, когда корректирующий сигнал добавляется к соответствующему выходному сигналу и откорректированная выходная переменная более в вычислениях не участвует.

Приблизительно оценим, какой выигрыш в помехоустойчивости получается от введения избыточности и такой коррекции вперед [2].

На рисунке 3 приведена зависимость коэффициента  $\epsilon$ , который характеризует увеличение помехоустойчивости, от избыточности, от числа контрольных условий  $k$  для различных значений  $n$ . Эффект от введения избыточности получается тем больше, чем больше  $n$ .

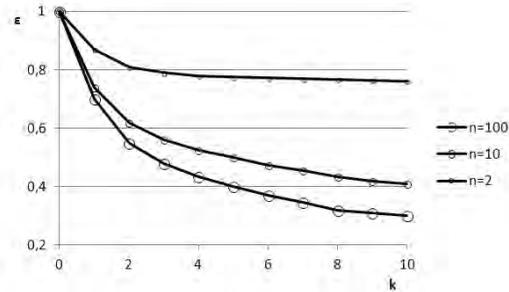


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $\varepsilon$  от избыточности

В избыточных структурах с обратными связями и с нелинейными контрольными условиями открываются дополнительные возможности для увеличения помехоустойчивости.

**4. Коррекция при помощи поворачивающейся контрольной плоскости.** Рассмотрим вопрос коррекции при помощи поворачивающейся плоскости на конкретном примере.

Пусть необходимо корректировать работу компьютерной модели, воспроизводящей уравнение Пфаффа в виде:

$$F_1 dy_1 + F_2 dy_2 = 0.$$

Для этого введем избыточность по формуле (3) и наложим линейное контрольное условие на имеющиеся переменные по формуле (12). Дифференциальные формы расширенной системы имеют вид:

$$\sum_{j=1}^3 (a_j F_1 + b_j F_2) dx_j = 0, \quad \sum_{j=1}^3 m_j dx_j = 0.$$

Допустим, воспроизводимая функция в данном случае имеет вид:

$$y_1^2 + y_2^2 = R^2.$$

Назначим коэффициентам  $a_j, b_j$  значения  $a_1 = 1, a_2 = 1.1, a_3 = 0.9, b_1 = 0.9, b_2 = 1, b_3 = 1.1$ .

По методу [2] построим расширенную систему дифференциальных уравнений и определим начальные условия.

Для каждого рассмотренного в эксперименте численного метода будем рассчитывать погрешность вычислений по формулам:

$$\Delta_{FB} = \left| R^2 - (\tilde{x}_1 + 1.1\tilde{x}_2 + 0.9\tilde{x}_3)^2 - (0.9\tilde{x}_1 + \tilde{x}_2 + 1.1\tilde{x}_3)^2 \right|,$$

$$\Delta_{FK} = \left| R^2 - (x_1^* + 1.1x_2^* + 0.9x_3^*)^2 - (0.9x_1^* + x_2^* + 1.1x_3^*)^2 \right|$$

для случаев без коррекции и с коррекцией соответственно.

Заддим матрицу коэффициентов:

$$\begin{vmatrix} m_1' & m_2' & m_3' \\ m_1'' & m_2'' & m_3'' \\ m_1''' & m_2''' & m_3''' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1.001 & 1 & 1 \\ 1.001 & 1.001 & 1 \end{vmatrix}$$

и коэффициенты  $m_1''' = 1.002$ ,  $m_2''' = 1$ ,  $m_3''' = 1$ .

Далее были проведены исследования влияния данной коррекции на работу модели. В таблице 1 показаны величины  $\Delta_{4T}$  и  $\Delta_{4П}$  для некоторых численных методов [1, 4], шагов дискретизации  $d$  (использовался при расчете корректирующего сигнала) и времени моделирования. Полученные результаты использовались для различных шагов дискретизации  $d'$ . Наиболее интересные графики зависимости  $\Delta_{FK}$  (с коррекцией) и  $\Delta_{F6}$  (без коррекции) от шага дискретизации представлены на рисунках 4–6.

Таблица 1. Погрешность при использовании поворачивающейся контрольной плоскости

Метод	Шаг дискретизации, $d$	Интервал моделирования	$\Delta_{4T}$	$\Delta_{4П}$
Рунге-Кутты	0.005	0.0005	0.000448077	0.000448078
		0.005	0.004478353	0.004478353
		0.01	0.008951326	0.008951327
Heun	0.005	0.005	0.004783527	0.0047835273
		0.01	0.008951325	0.008951326

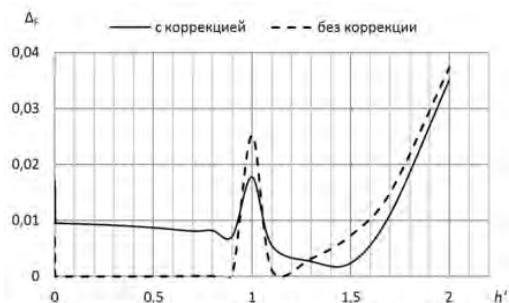


Рис. 4. Графики зависимости  $\Delta_{FK}$  и  $\Delta_{F6}$  от шага дискретизации  $d'$  (метод Рунге–Кутты, шаг дискретизации  $d$  0.0005,  $t_1 = 0.0005$ )

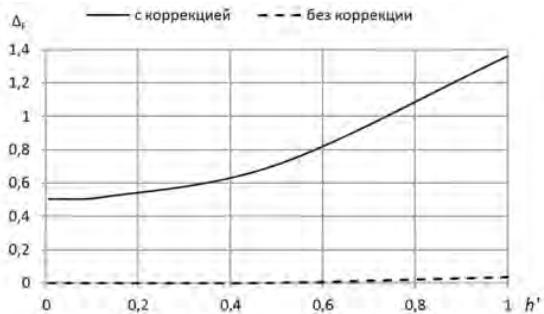


Рис. 5. Графики зависимости  $\Delta_{FK}$  и  $\Delta_{FB}$  от шага дискретизации  $d'$  (метод Neun, шаг дискретизации  $d = 0.005$ ,  $t_1 = 0.005$ )

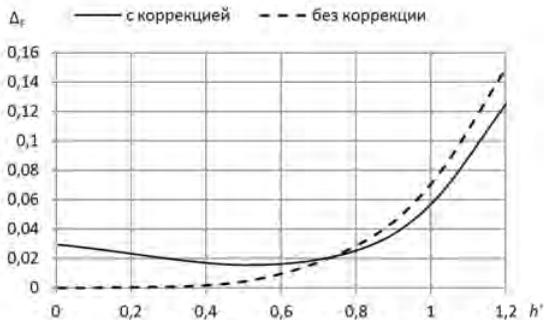


Рис. 6. Графики зависимости  $\Delta_{FK}$  и  $\Delta_{FB}$  от шага дискретизации  $d'$  (метод Neun, шаг дискретизации  $d = 0.005$ ,  $t_1 = 0.01$ )

Таким образом, можно сделать вывод, что использовать метод коррекции при помощи поворачивающийся контрольной плоскости можно в том случае, когда величина погрешности с коррекцией удовлетворяет условиям задачи. Для этого необходимо провести ряд исследований, которые могут быть выполнены автоматически в режиме реального времени.

**5. Сравнение метода избыточных переменных с другими известными методами контроля, диагностики и коррекции вычислительных систем.** Для обеспечения точности и надежности вычислительных систем обычно производится введение избыточности на различных уровнях: на уровне технической реализации это может быть сигнальная или структурная избыточность, а на абстрактном

уровне — информационная или алгоритмическая избыточность. Все способы введения аппаратной или временной избыточности могут быть разделены на четыре большие группы.

а) Тестовый контроль — подача на систему стимулирующего воздействия и сравнения ее реальной реакции с идеальной. Известно много разновидностей тестового контроля: проверка прохождения стандартных сигналов в радиоаппаратуре, решение тестовых задач, проверка характеристик аппаратуры и номинальных значений параметров схем и т.д. Характеризуется значительной временной избыточностью при малых аппаратурных затратах [2].

б) Контроль на основе резервирования. Этот метод применим практически к любым системам и на любом уровне. Недостаток метода заключается в большом объеме аппаратной избыточности (удвоение, утроение и т.д.). Метод широко применяется на практике.

в) Методы теории кодирования. Первоначально применялась к помехоустойчивой передаче двоичных сигналов. Позволяет получить более значительные результаты при организации контроля, диагностики и коррекции ошибок по сравнению с резервированием, но область ее применения гораздо уже.

г) Логический контроль. Для контроля используется проверка различных соотношений, связывающих контролируемые параметры. Способы этой группы требуют меньшей избыточности, чем резервирование и имеют большую область применения, чем методы теории кодирования. К этой группе способов можно отнести и МИП.

Сравним МИП с некоторыми известными способами повышения помехоустойчивости. Один способ реализации МИП — использование операции сжатия для борьбы с помехами. Матрица расширения в этом случае будет:

$$\begin{pmatrix} a_1^1 & a_2^1 & \dots & a_{n_1}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1^n & a_2^n & \dots & a_{n_1}^n \end{pmatrix},$$

Далее, в технике измерений часто используют способ многократного отсчета, при этом  $y = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$ , и матрица расширения в этом случае будет:

$$\left\| \frac{1}{n} \quad \frac{1}{n} \quad \dots \quad \frac{1}{n} \right\|.$$

При статически независимых отсчетах с равными дисперсиями получим улучшение точности системы:

$$D(y) = \frac{1}{n} D(x_j).$$

Для систем с контрольным условием, что равносильно включению в систему нового уровня, матрица расширения по МИП будет:

$$\left\| \begin{array}{cccc} a_1^1 & a_2^1 & \dots & a_{n_1}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1^n & a_2^n & \dots & a_{n_1}^n \\ m_1^1 & m_2^1 & \dots & m_{n_1}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_1^k & m_2^k & \dots & m_{n_1}^k \end{array} \right\|.$$

Дублирование и мажоритарные методы являются частными случаями МИП. Обозначив через  $X_1$  и  $X_2$  выходные сигналы дублированных блоков (рис. 7), можно записать контрольное условие  $X_1 - X_2 = 0$ , и матрица расширения для этого случая будет:

$$\left\| \begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{array} \right\|$$

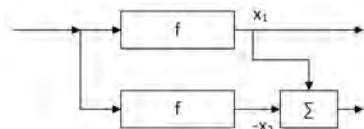


Рис. 7. Дублирование

Для системы с утроением блоков и мажоритарным выбором результата (рис. 8) контрольные условия будут  $X_1 - X_2 = 0$ ,

$X_1 - X_3 = 0$ ,  $X_2 - X_3 = 0$ , а матрица расширения с учетом линейной зависимости этих контрольных условий будет:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

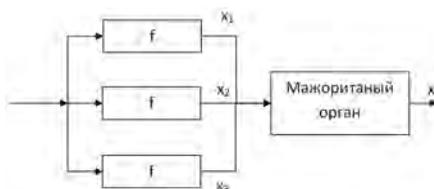


Рис. 8. Система с утروением блоков и мажоритарным выбором результата

Таким образом, МИП может рассматриваться как обобщение и развитие известных способов повышения надежности и точности работы вычислительных систем.

**6. Заключение.** В данной статье были рассмотрены важные аспекты метода избыточных переменных для контроля и коррекции вычислительных систем в реальном времени, в том числе и при помощи поворачивающейся контрольной плоскости. Эксперименты показали, что с применением МИП возможно в некоторых случаях уменьшить величину ошибки, при этом не увеличивая значительно сложность системы. В связи с этим в дальнейшем может быть поставлена задача определения целесообразности применения коррекции с поворачивающейся плоскостью автоматически, проведения экспериментов в режиме реального времени. Системы с алгебраической коррекцией и гибкие избыточные структуры подробно рассмотрены в работе [2].

Проведенное сравнение метода избыточных переменных с другими известными методами показало преимущество этого метода по ряду параметров.

### Литература

1. Амосов А.А., Дубянский Ю.А., Копченев Н.В. Вычислительные методы для инженеров: Учеб. Пособие // М.: Высш. шк. 1994.
2. Игнатьев М.Б., Катермина Т.С. Контроль и коррекция вычислительных процессов в реальном времени на основе метода избыточных переменных: Учебное пособие // Нижневартовск: изд-во НВГУ. 2014.
3. Игнатьев М.Б., Катермина Т.С. Метод избыточных переменных для контроля и диагностики вычислительных процессов в реальном времени // Труды СПИИ-РАН. СПб. 2013. Вып. 3(26). С. 234-252.

4. *Burrage K., Lenane I., Lythe G.* Numerical Methods for Second-Order Stochastic Differential Equations // *SIAM Journal on Scientific Computing*. 2007. vol. 29. no. 1. pp. 245–264.
5. *Ignatiev M.B.* The checking and correction of analog and hybrid computation by the redundant variables method // *Annales de l'Association Internationale pour le Calcul analogique*. Bruxelles. 1968. vol. 3. pp. 23–33.

## References

1. Amosov A.A., Dubjanskij Ju.A., Kopchenov N.V. *Vychislitel'nye metody dlja inzhenerov: Ucheb. posobie* [Computational Methods for Engineers: A Tutorial]. Moscow: Vyssh. shk. 1994. (In Russ.)
2. Ignatiev M.B., Katermina T.S. *Kontrol' i korrekcija vychislitel'nyh processov v real'nom vremeni na osnove metoda izbytochnyh peremennyh: Uchebnoe posobie* [Checking and correction of computing processes in real time based on the redundant variables method: A Tutorial]. Nizhnevartovsk: NVSU. 2014. (In Russ.)
3. Ignatiev M.B., Katermina T.S. [The redundant variables method for checking and correction of computing processes in real time]. *Trudy SPIIRAN - SPIIRAS Proceedings*. SPb. 2013. no. 3(26). pp. 234–252. (In Russ.)
4. Burrage K., Lenane I., Lythe G. Numerical Methods for Second-Order Stochastic Differential Equations. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 2007. vol. 29. no. 1. pp. 245–264.
5. Ignatiev M.B. The checking and correction of analog and hybrid computation by the redundant variables method. *Annales de l'Association Internationale pour le Calcul analogique*. Bruxelles. 1968. vol. 3. pp. 23–33.

**Игнатъев Михаил Борисович** — д-р техн. наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП), директор Международного института кибернетики и артоники при ГУАП. Область научных интересов: кибернетика, информатика, системный анализ. Число научных публикаций — 916. [ignatmb@mail.ru](mailto:ignatmb@mail.ru) [www.aanet.ru](http://www.aanet.ru); Большая Морская улица, 67, Санкт-Петербург. 190000, РФ; p.t. +7(812)494-7044, факс +7(812)710-6510.

**Ignatyev Mikhail Borisovich** — Ph.D, Dr.Sci., professor, St-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP), Director of International Institute of Cybernetics and Artonics in GUAP. Research interests: cybernetics, informatics, systemic. The number of publications — 916. [ignatmb@mail.ru](mailto:ignatmb@mail.ru) [www.aanet.ru](http://www.aanet.ru). 67 Bolshaja Morskaja uliza, St-Petersburg, 190000, Russia; office phone +7(812)494-7044, fax +7(812)710-6510.

**Катермина Татьяна Сергеевна** — аспирант Нижневартковского государственного университета; преподаватель кафедры информатики и методики преподавания информатики Нижневартковского государственного университета. Область научных интересов: кибернетика, информатика, системный анализ; число научных публикаций — 13. [nggu-lib@mail.ru](mailto:nggu-lib@mail.ru); Ул. Ленина, 56, Нижневартовск, 628600, РФ; p.t. +7(3466)43-5587, факс +7(3466)43-5587.

**Katermina Tatiana Sergeevna** — aspirant of Niznevartovsk State University; lecturer in computer science and computer science teaching methods of Niznevartovsk State University. Research interests: cybernetics, informatics, systemic. The number of publications — 13. [nggu-lib@mail.ru](mailto:nggu-lib@mail.ru). Lenin St., 56, Niznevartovsk, 628600, Russia; office phone +7(3466)43-5587, fax +7(3466)43-5587.

## РЕФЕРАТ

### *Игнатьев М.Б., Катермина Т.С.* **Метод избыточных переменных для контроля и коррекции вычислительных процессов в реальном времени. Часть 2.**

В данной работе продолжается рассмотрение вопроса применения метода избыточных переменных для контроля, коррекции и диагностики вычислительных систем. Суть предлагаемого метода заключается в том, чтобы использовать естественную избыточность системы или избыточность внесенную искусственно для повышения точности и надежности вычислительной системы. В статье указывается несколько способов применения метода избыточных переменных. Метод избыточных переменных для обеспечения надежности вычислительных систем может применяться по различным схемам: для коррекции вперед, для организации обратной связи. Важной частью статьи является доказательство эквивалентности исходных и расширенных систем. Далее рассматриваются вопросы улучшения помехозащищенности вычислительной системы, методы борьбы как с первичными, так и со вторичными ошибками. Показано, что в зависимости от рассматриваемых задач вычислительного процесса могут применяться линейные или нелинейные контрольные условия. Линейные контрольные условия оказываются весьма полезными для уменьшения влияния первичных ошибок, в то время как нелинейные могут быть использованы для выявления как первичных, так и вторичных ошибок. Подробно рассмотрен вопрос организации коррекции вперед при помощи исследований, проведенных с поворачивающейся контрольной плоскостью. Приведены результаты некоторых таких исследований. Далее в статье приведен сравнительный анализ метода избыточных переменных с другими известными методами обеспечения надежности систем, развитием и обобщением которых можно назвать и исследуемый здесь метод.

## SUMMARY

### *Ignatyev M.B., Katermina T.S.* **The redundant variables method for checking and correction of computing processes in real time. Part 2.**

In this paper the consideration of the application of the redundant variables method for checking and correction of computing processes in real time is continued. The essence of the method is to use the natural redundancy or the artificial one to improve the accuracy and reliability of the computer system. The article points out several ways of applying the redundant variables method. the redundant variables method for ensuring the reliability of computer systems can be used for different schemes: for correcting ahead for providing feedback. An important part of the paper is to prove the equivalence of the original and extended systems. Further questions of improving the immunity of the computing system, methods of dealing with both the primary and secondary errors are considered. It is shown that depending on the objectives of the computational process either linear or nonlinear control conditions may be used. Linear control conditions are very useful to reduce the influence of the primary errors, whereas the nonlinear ones may be used to identify both primary and secondary errors. The issue of correcting ahead using research of the rotatable control plane is described in detail. Results of the research are given in the paper. Further in this article a comparative analysis of the method of redundant variables and other known methods of ensuring reliability of the systems is considered. The redundant variables method can be called as development and generalization of these methods.

А.Е. КОЧУРА, Л.В. ПОДКОЛЬЗИНА, Я.А. ИВАКИН,  
И.И. НИДЗИЕВ

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ С ВАРЬИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО РАЗРЕЖЕННОСТЬ МАТРИЦЫ

---

*Кочура А.Е., Подкользина Л.В., Ивакин Я.А., Нидзиев И.И.* Разработка алгоритма решения систем линейных уравнений с варьируемыми параметрами, использующего разреженность матрицы.

**Аннотация.** В статье проанализированы достоинства и недостатки прямых и итерационных методов решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большой размерности (БР). Предложен новый «прямой» метод (алгоритм) решения СЛАУ с варьируемыми параметрами для матриц БР на основе учета их разреженности и информации о решении базовой СЛАУ. Это позволяет существенно повысить быстродействие расчетных алгоритмов за счет уменьшения количества вычислительных операций; снизить требования к объемам оперативной памяти ЭВМ.

**Ключевые слова:** системы линейных алгебраических уравнений, большая размерность, многовариантные расчеты, декомпозиция, технологии разреженных матриц, схема вариаций, диакоптика, уравнение Крона.

*Kochura A.E., Podkolzina L.V., Ivakin Y.A., Nidziev I.I.* Development of algorithm of the decision of systems linear equations with the varied parameters, using the matrix sparseness.

**Abstract.** Merits and demerits of straight and iterative methods for BD LAES are shown. In article is offered the new «direct» method (algorithm) for solution of BD LES with varied parameters. It effectively uses basic solution LAES and matrix sparseness information and allows in the tasks using BD LAES, which need to be solved repeatedly, significantly increase speed of settlement algorithms due to reduction of number of computing operations, to lower requirements for random access memory volumes of computers.

**Keywords:** systems of the linear equations, big dimension, multiple calculations, decomposition, technologies of the rarefied matrixes, the scheme of variations, diakoptics, the equation Krone.

---

**1. Введение.** В основе большого числа важных научно-прикладных и производственно-технических задач лежит решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Особый класс СЛАУ - системы с большими разреженными матрицами (БРМ). Математические модели, использующие СЛАУ с БРМ, применяются при изучении статического равновесия физических, технических, биологических, производственно-экономических [9] и других типах систем; при решении с помощью конечно-разностных методов или методов конечных элементов многочисленных задач из области математической физики, строительной механики, механики конструкций летательных и иных аппаратов; прогнозирования метеорологических и гидрогеологических [2] процессов; обеспечения работы графических

процессоров [16] и пр. Актуальность проблематики решения СЛАУ с БРМ подчеркивается публикацией большого количества работ – как учебного характера [1], так и научного. Для последней группы стоит отметить как классические работы [4, 10], так и ряд современных [5, 6, 12]. В некоторых случаях для решения указанных задач необходимы многовариантные расчеты, в которых различаются лишь небольшое количество элементов матрицы СЛАУ. Целью данной статьи была разработка специальных алгоритмов для решения СЛАУ с БРМ именно такого класса задач.

Двумя основными группами методов решения СЛАУ являются «прямые» и «итерационные». Несмотря на то, что итерационные методы позволяют во многих случаях эффективно решать СЛАУ с БРМ с минимальным использованием оперативной памяти [17], на практике их применение все же остается достаточно ограниченным. Основные причины такого положения: сложности при выборе начального приближения «вектора решения»; медленная сходимость (а для некоторых вариантов прямых методов и отсутствие гарантированной сходимости) к решению; в общем случае - сложность определения целесообразного момента завершения итераций при немонотонной сходимости и пр. Поэтому в данной статье рассматриваются только прямые методы.

Такие методы для СЛАУ небольшой размерности уже давно хорошо разработаны [11] и реализованы в виде высококачественного программного обеспечения для современных ПЭВМ в виде автономных программ и пакетов прикладных программ. Для СЛАУ с БРМ существуют специальные коллекции матриц [19]; алгоритмы [21] и библиотеки программ [13, 20], в т.ч. позволяющие учесть характер расположения ненулевых коэффициентов в матрицах. Особо отметим алгоритмы, позволяющие эффективно организовать вычисления с различными правыми частями СЛАУ; алгоритмы для ленточных матриц [4, 10] и пр. Однако в большинстве типичных алгоритмов при изменении небольшого количества коэффициентов матрицы в СЛАУ с БРМ все вычисления приходится выполнять с самого начала. При этом для сокращения времени получения результатов может быть использование распараллеливание вычислений [3, 14, 18], в т.ч. и с применением «вычислительных кластеров».

Однако даже при использовании высокоскоростных вычислительных систем [6] многовариантные расчеты с варьируемыми параметрами матриц СЛАУ могут требовать слишком больших вычислительных затрат. Это особенно актуально для моделирования и, возможно, управления процессами, протекающими в реальном времени.

Например, для задач прогнозирования погоды в метеорологии и большого числа задач, связанных с оперативной обработкой информации. Также это актуально для больших задач вариантного планирования в производственно-экономической сфере, включая транспортные задачи большой размерности, распределения ресурсов и пр.

Все возможные случаи многовариантных расчетов СЛАУ допускают обобщенную формализацию в виде проблемы параметрического синтеза линейной модели в ограниченном пространстве варьируемых параметров. В рамках такой схематизации могут учитываться и возможные структурные вариации исследуемой системы.

Для значительной части практически важных случаев многовариантных расчетов, в которых используются СЛАУ с БРМ, количество варьируемых элементов матрицы СЛАУ значительно меньше размерности СЛАУ, т.е. на каждом шаге вариантного анализа системы осуществляется ее локальная параметрическая модификация. Для расчетов таких систем целесообразным, по критериям экономичности вычислительных схем, представляется использование таких алгоритмов, в которых максимально эффективно использовалось бы решение для базовой модели, соответствующей исходной СЛАУ с БРМ. В качестве такой модели может выступать некоторая начальная параметрически определенная модель исследуемой системы или ее модель на предыдущем шаге многовариантного вычислительного процесса.

**2. Существующие подходы к решению параметрически возмущенных линейных систем.** Расчетная модель параметрически возмущенной линейной системы, связанной с рассматриваемой моделью задачи, имеет вид:

$$(A_0 + \tilde{A})X = B, \quad (1)$$

где  $A_0$  – основная матрица;  $\tilde{A}$  – матрица вариаций коэффициентов базовой системы;  $X$  – вектор неизвестных;  $B$  – вектор свободных членов базовой (исходной) СЛАУ.

Примем, что матрица  $\tilde{A}$  имеет сильно разреженную структуру. Если использовать стандартные методы решения СЛАУ, то при различных ее «разложениях» разреженная структура матрицы «разрушается» и она становится в общем случае полностью заполненной ненулевыми коэффициентами:

$$(I + A_0^{-1} \tilde{A})X = X_0. \quad (2)$$

Здесь  $X_0$  – решение базовой СЛАУ;  $I$  – единичная матрица. Решение системы (2) даже менее экономично, чем новый расчет исход-

ной СЛАУ с основной матрицей в виде  $A_0 + \tilde{A}$ , поскольку сопровождается дополнительной потерей вычислительного времени за счет операций вычисления  $A_0^{-1} \tilde{A}$ .

Известные методы для СЛАУ с «ленточными» разреженными матрицами имеют достаточно ограниченную сферу применения, т.к. далеко не для всех задач матрицы имеют ленточную структуру. Кроме того, если ширина «ленты» по отношению к размерности матрицы достаточно велика, то преимущества «ленточных алгоритмов» по отношению к алгоритмам для «полных» матриц утрачиваются [11].

Известный путь рационального использования разреженного характера матрицы вариаций  $\tilde{A}$  связан с применением «преобразования Крона», модифицированного для СЛАУ общего (несимметричного) вида [7, 8]. Соответствующий алгоритм в общем случае требует описания схемы вариаций модифицируемой СЛАУ на основе двух неполяризованных матриц инциденций: матрицы  $S_1$  на множестве заходящих ветвей схемы вариаций и матрицы  $S_2$  на множестве исходящих ветвей этой схемы. Используемая терминология вытекает из сопоставления модели вида (1) и ассоциированного с ней глобального орграфа с кодом  $\{n, m, P\}$ . Здесь  $n$  – количество узлов орграфа;  $m$  – количество ветвей орграфа,  $P$  –  $m$  - компонентный вектор весовых коэффициентов ветвей.

Узлы орграфа отображают структурные переменные модели, а ветви – взаимосвязи этих переменных. Лексикографически упорядоченная нумерация узлов и ветвей глобального орграфа обуславливает взаимно однозначное соответствие между компонентами вектора  $P$  и множеством значений ненулевых элементов основной матрицы СЛАУ, используемой в модели. Для подграфа схемы вариаций компонентами кода  $\{n, m, P\}$  будут служить:  $n$  – общее число узлов глобального орграфа;  $m$  - число варьируемых коэффициентов основной матрицы;  $P$  - вектор их вариаций.

С помощью матриц инциденций вариацию основной матрицы для модели по (1) можно определить формулой

$$\tilde{A} = S_1 D S_2^T, \quad (3)$$

где  $D = \text{diag}(P)$ .

Если ввести дополнительный  $m$  – компонентный вектор  $v$ :

$$v = D S_2^T X, \quad (4)$$

то уравнение (1) можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} A_0 X + S_1 v &= B; \\ v &= D S_2^T X. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Решение системы (5) получим в виде:

$$X = (I_n - A_0^{-1} S_1 M_v^{-1} D S_2^T) X_0, \quad (6)$$

где  $M_v = I_m + D S_2^T A_0^{-1} S_1$ ;  $I_m$  – единичная матрица порядка  $m$ .

Выражение (6) представляет собой диакоптику Крона, модифицированную для системы уравнений общего вида. При отыскании решения  $n$ -мерной варьируемой модели (1) по формуле (6) порядок обращаемой матрицы  $M_v$  равен числу  $m$  варьируемых коэффициентов, которое во многих задачах существенно меньше порядка (размерности)  $n$  СЛАУ для базовой модели. При этом в вычислительной схеме участвует не полная обратная матрица  $A_0^{-1}$  базовой модели, а только часть ее столбцов, соответствующих ненулевым строкам матрицы  $S_1$ . Их число равно количеству структурных переменных схемы вариаций. Матричный множитель  $A_0^{-1} S_1$  может быть построен на основе матрицы  $S_1$ , в которой каждый  $j$ -ый столбец с «1» в позиции  $(i, j)$  заменяется  $i$ -ым столбцом матрицы  $A_0^{-1}$ .

Практическая реализация алгоритма (6) построения решения СЛАУ для моделей с варьируемыми коэффициентами СЛАУ осуществляется в виде совокупности следующих матричных процедур (операций):

$$\left. \begin{aligned} M_v Z &= D S_2^T X_0; \\ X^* &= A_0^{-1} S_1 Z; \\ X &= X_0 - X^* . \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Таким образом, решение в виде вектора  $X$  для «варьируемой» модели, описываемой уравнением вида (1) определяется как коррекция решения  $X_0$  базовой СЛАУ. Для определения корректирующего вектора  $X^*$  необходимо решить СЛАУ с основной матрицей  $M_v$  по-

рядка  $m$ . Из выражения (6) также следует, что обратная матрица  $(A_0 + \tilde{A})^{-1}$  модифицированной СЛАУ имеет вид:

$$(A_0 + \tilde{A})^{-1} = A_0^{-1} - A_0^{-1} S_1 M_v^{-1} D S_2^T A_0^{-1}. \quad (8)$$

Зависимость (8) представляет собой обобщение известного тождества Шермана-Моррисона для обращения матрицы с диадным дополнением.

Если рассматривать расширенное фазовое пространство модели (1), соответствующее координатному вектору  $X \oplus v$ , то уравнение (1) можно представить в следующей блочно-структурированной форме:

$$\left( \left[ \begin{array}{c|c} A_0 & 0_{nm} \\ \hline 0_{mn} & 0_{mm} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c|c} 0_{nm} & S_1 \\ \hline D S_2^T & -I_m \end{array} \right] \right) \begin{bmatrix} X \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ 0_{m1} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где  $0_{nm}, 0_{mn}, 0_{mm}$  – «нулевые» матрицы с размерностями соответственно  $n \times m, m \times n, m \times m$ ;  $V - m$  - компонентный вектор;  $0_{m1}$  – «нулевой» вектор размерностью  $m$ .

В уравнении (9) матрица вариаций имеет существенно разреженную упорядоченную структуру так называемого  $T_n^{(m)}$  – типа [2]. Важным свойством  $T_n^{(m)}$  – структурированной матрицы вариаций является инвариантность ее формы относительно преобразований основной матрицы базовой СЛАУ. Осуществляя эквивалентное преобразование уравнения (9) с левым неособенным множителем  $L$  вида:

$$L = \left[ \begin{array}{c|c} A_0^{-1} & 0_{nm} \\ \hline -D S_2^T A_0^{-1} & I_m \end{array} \right], \quad (10)$$

представим уравнение (9) следующим образом:

$$\left[ \begin{array}{c|c} I_n & A_0^{-1} S_1 \\ \hline 0_{mn} & -I_m - D S_2^T A_0^{-1} S_1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} X \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ -D S_2^T A_0^{-1} B \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Преобразование модели (9) с множителем  $L$  объединяет операцию обращения базовой модели и прямую подстановку Гаусса, осуществляемую в основном фазовом пространстве рассматриваемой модели. Обратная подстановка в системе (11) приводит к формуле (6) для решения модифицируемой СЛАУ вида (1).

Преобразование согласно зависимостям (9)-(11) представляет собой интерпретацию обобщенного алгоритма Крона в виде  $T_n^{(m)}$  – структуризации модифицируемой модели вида (1). Вычислительную эффективность такой структуризации можно оценить ее профильной характеристикой – шириной  $m$  окаймления в  $T_n^{(m)}$  – формате матрицы вариаций. В алгоритме Крона профиль  $T_n^{(m)}$  – структуры матрицы вариаций определяется числом варьируемых элементов основной матрицы исследуемой СЛАУ, что непосредственно вытекает из мультипликативной факторизации для матрицы вариаций в виде (3). При этом совершенно не учитываются особенности заполнения матрицы вариаций в каждом конкретном случае. В частности, такие важные характеристики разреженности матрицы  $\tilde{A}$ , как локальные группировки элементов этой матрицы в пространстве ее строк и столбцов. Показательной в этом отношении является ситуация, когда матрица вариаций  $n$  – мерной СЛАУ состоит из  $n$  элементов, принадлежащих одной строке или столбцу. Применение в такой ситуации алгоритма (6) теряет смысл, так как приводит к необходимости обращения матрицы  $M_v$  того же порядка, что и у основной матрицы  $A_0$  базовой модели.

### 3. Предлагаемые модификации существующих алгоритмов.

Между тем ярко выраженный векторный характер группировки элементов матрицы вариаций в указанных случаях позволяет построить исключительно эффективную вычислительную схему для нахождения решения соответствующей модифицированной модели.

Примем, что в матрице вариаций  $\tilde{A}$  порядка  $n$  отличные от нуля элементы сгруппированы в  $i$  – ой строке, которую обозначим через  $R_i$ . Тогда матрицу вариаций можно представить в диадной форме:

$$\tilde{A} = e_i R_i, \quad (12)$$

где  $e_i$  – единичный  $n$  – компонентный вектор с «1» в  $i$  – ой позиции. Такая факторизация матрицы вариаций позволяет осуществить  $T_n^{(1)}$  – структуризацию модифицируемой СЛАУ с минимальным профилем ( $m = 1$ ) в расширенном  $(n + 1)$  – мерном фазовом пространстве:

$$\begin{bmatrix} I_n & A_0^{-1} e_i \\ R_i & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где  $V$  – скаляр, так как  $m=1$ .

Реализуя алгоритм Гаусса, решение для (13) получим в виде:

$$X = X_0 - \frac{R_i X_0}{1 + R_i h_i} h_i. \quad (14)$$

В формуле (14)  $h_i$  –  $i$  – ый столбец матрицы  $A_0^{-1}$ . Таким образом, в рассматриваемом случае объем вычислений для алгоритма решения модифицированной модели  $n$  – го порядка с  $n$  варьируемыми элементами, полученного на основе  $T_n^{(1)}$  – структуризации модели, определяется двумя скалярными произведениями. В вычислительном отношении это на два порядка экономичнее, чем прямое решение нового параметрического варианта исследуемой модели с основной матрицей  $A_0 + \tilde{A}$  или решение этого варианта по алгоритму Крона. Отличительной чертой методов, объединяемых названием «технологии разреженных матриц» (10), является эффективное использование разреженности обрабатываемых матриц с позиций экономии оперативной памяти ЭВМ и/или количества вычислительных операций. Граница между плотными и разреженными матрицами в вычислительных задачах достаточно «нечеткая», поскольку само понятие разреженной матрицы является эвристическим: матрица считается «разреженной», если есть возможность извлечь «вычислительную выгоду» из наличия в ней достаточно большого числа нулевых элементов. Такая возможность, а, следовательно, и само определение разреженности матрицы опирается на три взаимосвязанных фактора: структуру заполненности обрабатываемой матрицы; применяемые алгоритмы вычислений; доступность и возможности вычислительных средств.

При наличии достаточно большого числа нулевых коэффициентов в обрабатываемой матрице, т.е. при существенной степени ее разреженности, определяющим фактором для вычислительно эффективного использования этого обстоятельства является упорядоченность структуры заполнения матрицы. Как правило, способы преобразования для обеспечения определенным образом упорядоченной структуры заполнения матриц состоят в перестановке строк и столбцов [10].

Кроме того, такие перестановки могут быть полезны для повышения точности получаемых решений, особенно при ограниченном количестве знаков в мантиссах чисел, применяемых в расчетах.

Если структура заполнения матрицы изначально никак не упорядочена, то найти соответствующие матрицы перестановок очень трудно. Для этой цели приходится привлекать различные методы ком-

бинаторики, теории графов, целочисленного программирования и т.п. Однако вычислительные затраты на предварительное преобразование разреженных матриц вполне окупаются, если сами матрицы имеют большие размеры, а задачи с ними решаются многократно. Известны примеры, когда удачное упорядочение основной матрицы СЛАУ большой размерности позволяло на несколько порядков уменьшить число выполняемых арифметических операций при решении системы и столь же эффективно сократить объем необходимой оперативной памяти [2].

$T_n^{(m)}$  – структуризация линейных моделей в расширенном фазовом пространстве представляет собой принципиально новый подход к проблеме использования разреженности обрабатываемых матриц. Главный смысл предлагаемой структуризации заключается не в упорядочении структуры заполнения матрицы, имеющей изначально разреженный характер, а в эквивалентном преобразовании исходной плотно заполненной матрицы в разреженную матрицу с унифицированной структурой заполнения. К сфере целесообразного применения  $T_n^{(m)}$  – структуризации моделей, описываемых СЛАУ можно отнести: задачи расчета сложных систем по частям; составные модели систем агрегатно-модульного типа; многовариантные расчеты линейных моделей при структурно-параметрических изменениях исследуемых систем, включая их радикальную реконструкцию за счет расширения или сжатия основного структурного пространства. В задачах такого рода основная матрица представляется суммой двух матриц, одна из которых (стабильная) соответствует некоторой основной (базовой) системе, а вторая (в общем случае варьируемая) отражает взаимосвязи между различными частями основной системы или изменения (вариации) ее параметров. Во всех названных случаях матричная расчетная модель имеет вид типа (1).

Критерием эффективности  $T_n^{(m)}$  – структуризации линейной модели служит профильная характеристика  $m$ . Обеспечение минимального профиля эквивалентной  $T_n^{(m)}$  – модели осуществляется за счет целенаправленной декомпозиции варьируемой составляющей основной матрицы  $\tilde{A}$  расчетной модели в пространстве ее строк и столбцов. Минимальный профиль определяется минимальным числом кортежей ненулевых элементов, группируемых в пространстве строк и/или столбцов матрицы  $\tilde{A}$ . Кортеж элементов, принадлежащих одной строке матрицы  $\tilde{A}$ , может быть представлен в диадной форме (12). В эквивалентной модели такому кортежу соответствует одномерный

профиль, как это следует из выражения (13). Аналогично можно показать, что кортеж элементов, принадлежащих одному столбцу матрицы  $\tilde{A}$ , при  $T_n^{(m)}$  – структуризации расчетной модели также порождает одномерную профильную составляющую в эквивалентной модели. Действительно, если ненулевые элементы матрицы  $\tilde{A}$  сгруппированы в одном столбце  $C_j$ , то эту матрицу можно представить в диадной форме:

$$\tilde{A} = C_j e_j^T, \quad (15)$$

а  $T_n^{(1)}$  – структурированный образ расчетной модели, то (1) примет следующий блочный вид:

$$\left[ \begin{array}{c|c} I_n & A_0^{-1} C_j \\ \hline e_j^T & -1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} X \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Решение системы (16) выражается формулой:

$$X = X_0 - \frac{x_{0j}}{1 + g_j C_j} A_0^{-1} C_j, \quad (17)$$

где  $x_{0j}$  –  $j$ -ый элемент вектора  $X_0$ ;  $g_j$  –  $j$ -ая строка матрицы  $A_0^{-1}$ .

В общем случае, когда эффективное использование особенностей структуры заполнения матрицы  $\tilde{A}$  предполагает смешанную группировку ее ненулевых элементов в виде отдельных строк и столбцов, применяется дуальная тактика диадной факторизации матрицы  $\tilde{A}$ , базирующаяся на соотношениях вида (12) и (15).

Пусть  $\tilde{R}$ ,  $\tilde{C}$  – декомпозиционные матрицы вариаций, представляющие собой непересекающиеся совокупности ненулевых  $p$  строк и  $q$  столбцов матрицы  $\tilde{A}$  порядка  $n$ . Тогда матрицу вариаций  $\tilde{A}$  можно записать в следующей аддитивной форме:

$$\tilde{A} = E_R \tilde{R} + \tilde{C} E_C^T, \quad (18)$$

где  $E_R$  и  $E_C$  – матрицы с размерами  $n \times p$  и  $n \times q$ , составленные из единичных векторов, отвечающих глобальным номерам (в основном фазовом пространстве расчетной модели) соответственно строк матрицы  $\tilde{R}$  и столбцов матрицы  $\tilde{C}$ . В рассматриваемом общем случае

$T_n^{(m)}$  – структурированную модель с профилем  $m = p + q$  расчетной системы вида (1) можно представить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} I_n & A_0^{-1} V \\ H & -I_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ 0_{m1} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где  $v - (p + q)$  – компонентный вектор дополнительных переменных, а  $H, V$  – блочные матрицы вида:

$$H = \begin{bmatrix} \tilde{R} \\ E_C^T \end{bmatrix}; \quad V = [E_R \mid \tilde{C}]. \quad (20)$$

Выполняя прямую подстановку Гаусса в пределах основного фазового пространства расчетной модели, получим решение системы (19):

$$X = \left[ I_n - A_0^{-1} V (I_m - H A_0^{-1} V)^{-1} H \right] X_0. \quad (21)$$

Построение по формуле (21) решения варьируемой модели с локально плотной матрицей вариаций  $\tilde{A}$ , содержащей в общем случае  $p(n - q) + qn$  элементов, потребует решения вспомогательной СЛАУ порядка  $(p + q) < n$ . Преобразование по алгоритму Крона в этом случае совершенно теряет смысл, так как приводит к необходимости решать СЛАУ порядка  $p(n - q) + qn$ , который при  $(p + q) > 1$  существенно превышает порядок исходной СЛАУ.

При  $T_n^{(m)}$  – структуризации линейной модели (1) на основе аддитивно-диадной факторизации матрицы вариаций в виде (18) минимизация профиля  $m$  эквивалентной модели достигается за счет последовательного выбора из матрицы  $\tilde{A}$  ее строки или столбца с наиболее длинным на текущем шаге кортежем ненулевых элементов. Выбираемые строки и столбцы помещаются в соответствующую декомпозиционную матрицу вариаций  $\tilde{R}$  или  $\tilde{C}$ . В общем случае одна из этих матриц может оказаться пустой.

Схема минимизации профиля  $T_n^{(m)}$  – структурированного пространства расчетной модели (1) может быть рационально реализована с использованием сжатых матриц инцидентий  $S_{1r}, S_{2r}$ . В матрицах этого вида участвуют только опорные узлы (структурные переменные)

схемы вариаций:  $r_1$  заходящих и  $r_2$  исходящих узлов. На основе сжатых матриц инцидентий для  $(r_1 + r_2)$ -узловой схемы вариаций можно построить сжатую  $r_1 \times r_2$ -матрицу вариаций  $\tilde{A}_r$  в форме, аналогичной выражению (3):

$$\tilde{A}_r = S_{1r} D S_{2r}^T. \quad (22)$$

Глобальная матрица вариаций  $\tilde{A}$  порядка  $n$  может быть реконструирована на основе сжатой матрицы вариаций, если последняя сопровождается двумя лексикографически упорядоченными номерными кортежами  $N_{1r}, N_{2r}$ , содержащими соответственно  $r_1$  и  $r_2$  элементов. Элементами этих кортежей служат глобальные (в основном структурном пространстве расчетной модели) номера узлов подграфа схемы вариаций, инцидентных соответственно заходящим и исходящим ветвям. Глобальная матрица вариаций может быть получена как расширение сжатой матрицы вариаций за счет последовательного формирования у последней  $n - r_1$  нулевых строк с номерами из множества  $N_1$  и  $n - r_2$  нулевых столбцов с номерами из множества  $N_2$  :

$$N_1 = N \setminus N_{1r}; \quad N_2 = N \setminus N_{2r}; \quad N = (1, \dots, n), \quad (23)$$

где символ «\» обозначает разность множеств.

Декомпозиция матрицы вариаций в пространстве ее строк и столбцов по предложенной выше схеме последовательного выбора строк и столбцов с наиболее длинными на текущем шаге кортежами ненулевых элементов первоначально осуществляется на основе сжатой матрицы вариаций  $\tilde{A}_r$ . В результате, в  $p \times q$ -подпространстве матрицы  $\tilde{A}_r$  формируются сжатые декомпозиционные матрицы вариаций  $\tilde{R}_r$  и  $\tilde{C}_r$  с размерами соответственно  $p \times r_2$  и  $r_1 \times q$ . Полные декомпозиционные матрицы вариаций  $\tilde{R}$  и  $\tilde{C}$ , отвечающие основному фазовому пространству расчетной модели, реконструируются на основе своих сжатых образов  $\tilde{R}_r$  и  $\tilde{C}_r$  за счет последовательного формирования:  $n - r_2$  нулевых столбцов с номерами из множества  $N_2$  - у матрицы  $\tilde{R}_r$ ;  $n - r_1$  нулевых строк с номерами из множества  $N_1$  - у матрицы  $\tilde{C}_r$ .

В качестве элементарного иллюстративного примера использования предложенных зависимостей рассмотрим леонтьевскую балансовую модель “затраты-выпуск” для условной десятиотраслевой производственно-экономической системы. Технологическую матрицу  $A$  системы и вектор  $B$  конечной продукции примем в виде:

$$A = \begin{bmatrix} 0.0132 & 0.0227 & 0.0423 & 0.0232 & 0.0140 & 0.0332 & 0.0275 & 0.0651 & 0.0422 & 0.0827 \\ 0.0225 & 0.0305 & 0.0571 & 0.0721 & 0.0117 & 0.0653 & 0.0820 & 0.0129 & 0.0351 & 0.0425 \\ 0.0343 & 0.0173 & 0.0413 & 0.0637 & 0.0885 & 0.0231 & 0.0497 & 0.0147 & 0.0829 & 0.0665 \\ 0.0453 & 0.0235 & 0.0180 & 0.0382 & 0.0116 & 0.0281 & 0.0479 & 0.0836 & 0.0373 & 0.0426 \\ 0.0216 & 0.0565 & 0.0146 & 0.0456 & 0.0732 & 0.0847 & 0.0429 & 0.1203 & 0.0338 & 0.0503 \\ 0.0132 & 0.0427 & 0.0623 & 0.0362 & 0.0140 & 0.0732 & 0.0675 & 0.0851 & 0.0222 & 0.0127 \\ 0.0325 & 0.0705 & 0.0471 & 0.0221 & 0.0117 & 0.0553 & 0.0910 & 0.1329 & 0.0654 & 0.0225 \\ 0.0143 & 0.0273 & 0.0833 & 0.0437 & 0.0265 & 0.0131 & 0.0897 & 0.0647 & 0.0429 & 0.0165 \\ 0.0253 & 0.0033 & 0.0851 & 0.0662 & 0.0436 & 0.0181 & 0.0911 & 0.0481 & 0.0233 & 0.0173 \\ 0.0226 & 0.0345 & 0.0846 & 0.0256 & 0.0132 & 0.0457 & 0.0729 & 0.0343 & 0.0438 & 0.0963 \end{bmatrix},$$

$$B = (2.73 \ 3.38 \ 3.45 \ 2.47 \ 3.49 \ 3.06 \ 3.75 \ 3.21 \ 3.27 \ 4.04)^T.$$

Для матрицы Леонтьева  $L_m = I - A$  и оператора Леонтьева  $L_0 = (I - A)^{-1}$  получены следующие выражения:

$$L_m = \begin{bmatrix} 0.9868 & -0.0227 & -0.0423 & -0.0232 & -0.0140 & -0.0332 & -0.0275 & -0.0651 & -0.0422 & -0.0827 \\ -0.0225 & 0.9695 & -0.0571 & -0.0721 & -0.0117 & -0.0653 & -0.0820 & -0.0129 & -0.0351 & -0.0425 \\ -0.0343 & -0.0173 & 0.9587 & -0.0637 & -0.0885 & -0.0231 & -0.0497 & -0.0147 & -0.0829 & -0.0665 \\ -0.0453 & -0.0235 & -0.0180 & 0.9618 & -0.0116 & -0.0281 & -0.0479 & -0.0836 & -0.0373 & -0.0426 \\ -0.0216 & -0.0565 & -0.0146 & -0.0456 & 0.9268 & -0.0847 & -0.0429 & -0.1203 & -0.0338 & -0.0503 \\ -0.0132 & -0.0427 & -0.0623 & -0.0362 & -0.0140 & 0.9268 & -0.0675 & -0.0851 & -0.0222 & -0.0127 \\ -0.0325 & -0.0705 & -0.0471 & -0.0221 & -0.0117 & -0.0553 & 0.9090 & -0.1329 & -0.0654 & -0.0225 \\ -0.0143 & -0.0273 & -0.0833 & -0.0437 & -0.0265 & -0.0131 & -0.0897 & 0.9353 & -0.0429 & -0.0165 \\ -0.0253 & -0.0033 & -0.0851 & -0.0662 & -0.0436 & -0.0181 & -0.0911 & -0.0481 & 0.9767 & -0.0173 \\ -0.0226 & -0.0345 & -0.0846 & -0.0256 & -0.0132 & -0.0457 & -0.0729 & -0.0343 & -0.0438 & 0.9037 \end{bmatrix},$$

$$L_0 = \begin{bmatrix} 1.0297 & 0.0442 & 0.0828 & 0.0521 & 0.0346 & 0.0598 & 0.0753 & 0.1067 & 0.0724 & 0.1128 \\ 0.0435 & 1.0580 & 0.0995 & 0.1054 & 0.0344 & 0.0991 & 0.1366 & 0.0679 & 0.0713 & 0.0753 \\ 0.0573 & 0.0472 & 1.0884 & 0.1022 & 0.1184 & 0.0617 & 0.1094 & 0.0774 & 0.1214 & 0.1063 \\ 0.0618 & 0.0459 & 0.0577 & 1.0666 & 0.0303 & 0.0544 & 0.0961 & 0.1297 & 0.0675 & 0.0708 \\ 0.0449 & 0.0914 & 0.0708 & 0.0885 & 1.1023 & 0.1285 & 0.1132 & 0.1901 & 0.0756 & 0.0887 \\ 0.0327 & 0.0699 & 0.1064 & 0.0708 & 0.0380 & 1.1059 & 0.1237 & 0.1389 & 0.0584 & 0.0418 \\ 0.0568 & 0.1043 & 0.1066 & 0.0669 & 0.0411 & 0.0953 & 1.1653 & 0.2005 & 0.1109 & 0.0595 \\ 0.0351 & 0.0540 & 0.1256 & 0.0784 & 0.0532 & 0.0438 & 0.1450 & 1.1187 & 0.0809 & 0.0479 \\ 0.0464 & 0.0308 & 0.1249 & 0.0994 & 0.0705 & 0.0497 & 0.1440 & 0.1050 & 1.0614 & 0.0500 \\ 0.0450 & 0.0640 & 0.1352 & 0.0632 & 0.0409 & 0.0822 & 0.1345 & 0.0897 & 0.0853 & 1.1367 \end{bmatrix}.$$

Вектор  $X_0$  валовой продукции условных отраслей, обеспечивающий равновесное функционирование рассматриваемой системы получен в виде:

$$X_0 = L_0 B = (4.9963 \ 5.9898 \ 6.4103 \ 4.7135 \ 6.7748 \ 5.6533 \ 7.0921 \ 5.8181 \ 5.8549 \ 7.0193)^T \cdot$$

Один из вариантов глобального управления системой рассматриваемого вида связан с прогнозированием необходимой для поддержания равновесия системы коррекции вектора валовой продукции  $X_0$  при технологической модернизации отдельных отраслей. На модельном уровне указанная модернизация приводит к изменению значений коэффициентов технологической матрицы системы, принадлежащих строке и столбцу матрицы, соответствующих модернизируемой условной отрасли. Причем, возможные изменения в общем случае имеют многовариантный характер, как в отношении модернизируемых отраслей, так и в отношении вариаций отдельных технологических коэффициентов.

В такой ситуации повторяемый расчетный блок предполагает определение равновесного вектора  $X_{\text{var}}$  валовых выпусков условных отраслей при одновременной вариации коэффициентов какой-либо строки технологической матрицы системы и одноименного столбца. Это соответствует рассмотренному в статье случаю векторной группировки варьируемых коэффициентов.

Предположим, что варьируются коэффициенты третьей строки и третьего столбца технологической матрицы анализируемой системы и рассмотрим один шаг в общем случае многовариантного процесса. Пусть на данном шаге вектор-строка  $\tilde{R}_3$  вариаций коэффициентов третьей строки технологической матрицы  $A$  и вектор-столбец  $\tilde{C}_3$  вариаций коэффициентов третьего столбца этой матрицы имеют вид:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_3 &= -(0.0137 \ 0.0069 \ 0.0165 \ 0.0255 \ 0.0354 \ 0.0092 \ 0.0199 \ 0.0059 \ 0.0332 \ 0.0266) \cdot \\ \tilde{C}_3 &= -(0.0190 \ 0.0257 \ 0.0186 \ 0.0081 \ 0.0066 \ 0.0280 \ 0.0212 \ 0.0375 \ 0.0383 \ 0.0381)^T \cdot \end{aligned}$$

Следуя общей зависимости (21), определим значение  $X_{\text{var}}$  по формуле:

$$\begin{aligned} X_{\text{var}} &= (I - L_0 V S^{-1} H) X_0 = \\ &= (4.7183 \ 5.6559 \ 5.0108 \ 4.5197 \ 6.5369 \ 5.2961 \ 6.7343 \ 5.3963 \ 5.4357 \ 6.5653)^T \cdot \end{aligned}$$

Участвующие в этой формуле матричные компоненты в соответствии с выражениями (20) получены в виде:

$$H = \begin{bmatrix} 0.0137 & 0.0069 & 0.0165 & 0.0255 & 0.0354 & 0.0092 & 0.0199 & 0.0059 & 0.0332 & 0.0266 \\ 0 & 0 & 1. & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0190 & 0.0257 & 0.0186 & 0.0081 & 0.0066 & 0.0280 & 0.0212 & 0.0375 & 0.0383 & 0.0381 \end{bmatrix}^T,$$

$$S = E_2 + HL_0V = \begin{bmatrix} 1.0354 & 0.0085 \\ 1.0884 & 1.0398 \end{bmatrix}.$$

При вычислении вектора  $X_{\text{var}}$  потребовалась операция обращения лишь матрицы  $S$  второго порядка.

Прямой метод расчета вектора  $X_{\text{var}}$  потребует построения нового оператора Леонтьева  $L_0^*$ , что будет связано с необходимостью обращения новой матрицы Леонтьева десятого порядка:

$$L_0^* = (L_m^*)^{-1} = [I - (A - VH)]^{-1}.$$

Матрицу  $L_m^*$  и оператор  $L_0^*$  Леонтьева новой системы можно получить в виде:

$$L_m^* = \begin{bmatrix} 0.9868 & -0.0227 & -0.0233 & -0.0232 & -0.0140 & -0.0332 & -0.0275 & -0.0651 & -0.0422 & -0.0827 \\ -0.0225 & 0.9695 & -0.0314 & -0.0721 & -0.0117 & -0.0653 & -0.0820 & -0.0129 & -0.0351 & -0.0425 \\ -0.0206 & -0.0104 & 0.9938 & -0.0382 & -0.0531 & -0.0139 & -0.0298 & -0.0088 & -0.0497 & -0.0399 \\ -0.0453 & -0.0235 & -0.0099 & 0.9618 & -0.0116 & -0.0281 & -0.0479 & -0.0836 & -0.0373 & -0.0426 \\ -0.0216 & -0.0565 & -0.0080 & -0.0456 & 0.9268 & -0.0847 & -0.0429 & -0.1203 & -0.0338 & -0.0503 \\ -0.0132 & -0.0427 & -0.0343 & -0.0362 & -0.0140 & 0.9268 & -0.0675 & -0.0851 & -0.0222 & -0.0127 \\ -0.0325 & -0.0705 & -0.0259 & -0.0221 & -0.0117 & -0.0553 & 0.9090 & -0.1329 & -0.0654 & -0.0225 \\ -0.0143 & -0.0273 & -0.0458 & -0.0437 & -0.0265 & -0.0131 & -0.0897 & 0.9353 & -0.0429 & -0.0165 \\ -0.0253 & -0.0033 & -0.0468 & -0.0662 & -0.0436 & -0.0181 & -0.0911 & -0.0481 & 0.9767 & -0.0173 \\ -0.0226 & -0.0345 & -0.0465 & -0.0256 & -0.0132 & -0.0457 & -0.0729 & -0.0343 & -0.0438 & 0.9037 \end{bmatrix},$$

$$L_0^* = \begin{bmatrix} 1.0267 & 0.0418 & 0.0427 & 0.0467 & 0.0284 & 0.0565 & 0.0696 & 0.1026 & 0.0661 & 0.1072 \\ 0.0399 & 1.0550 & 0.0513 & 0.0990 & 0.0269 & 0.0953 & 0.1297 & 0.0630 & 0.0637 & 0.0686 \\ 0.0322 & 0.0265 & 1.0198 & 0.0574 & 0.0666 & 0.0347 & 0.0615 & 0.0435 & 0.0683 & 0.0598 \\ 0.0597 & 0.0442 & 0.0297 & 1.0628 & 0.0260 & 0.0521 & 0.0921 & 0.1269 & 0.0631 & 0.0670 \\ 0.0423 & 0.0892 & 0.0365 & 0.0839 & 1.0970 & 0.1258 & 0.1082 & 0.1866 & 0.0701 & 0.0839 \\ 0.0288 & 0.0667 & 0.0548 & 0.0639 & 0.0300 & 1.1017 & 0.1163 & 0.1336 & 0.0502 & 0.0347 \\ 0.0529 & 0.1011 & 0.0549 & 0.0600 & 0.0331 & 0.0911 & 1.1579 & 0.1952 & 0.1027 & 0.0523 \\ 0.0305 & 0.0503 & 0.0647 & 0.0702 & 0.0437 & 0.0389 & 0.1363 & 1.1125 & 0.0713 & 0.0394 \\ 0.0419 & 0.0270 & 0.0643 & 0.0913 & 0.0611 & 0.0448 & 0.1353 & 0.0988 & 1.0518 & 0.0416 \\ 0.0401 & 0.0600 & 0.0697 & 0.0544 & 0.0307 & 0.0769 & 0.1251 & 0.0831 & 0.0749 & 1.1275 \end{bmatrix}.$$

Значение вектора  $X_{\text{var}}$ , полученное прямым методом:

$X_{\text{var}} = L_0^* B = (4.7183 \ 5.6559 \ 5.0108 \ 4.5197 \ 6.5369 \ 5.2961 \ 6.7343 \ 5.3963 \ 5.4357 \ 6.5653)^T$ ,  
подтверждает результат вычислений по компактной схеме.

Для большой системы порядка  $n$  в аналогичной расчетной ситуации определение вектора  $X_{\text{var}}$  по формуле (21) будет связано с обращением матрицы также второго порядка. Прямой же метод расчета потребует обращения матрицы порядка  $n$ .

**4. Заключение.** В статье предложен способ структуризации систем линейных уравнений с варьируемыми коэффициентами, обеспечивающий разреженный характер обрабатываемых матриц и, как следствие, существенное повышение вычислительной эффективности расчетных алгоритмов по сравнению с прямыми методами расчета больших линейных систем.

Практически важной особенностью выполняемой структуризации является минимальная профильная характеристика (количество кортежей варьируемых коэффициентов) разреженности обрабатываемых матриц при векторных вариациях коэффициентов уравнений. Это радикально отличает предложенный метод от известного диакоптического алгоритма Крона, в котором величина профиля получаемой разреженности расчетной матрицы определяется количеством одновременно варьируемых параметров.

Для сложных схем вариации коэффициентов уравнений предложен декомпозиционный подход, использующий сжатые матрицы вариаций коэффициентов и обеспечивающий минимизацию профиля  $T_n^{(m)}$  – структурированного пространства разреженной расчетной системы.

## Литература

1. *Блатов И. А., Китаева Е. В.* Численные методы для разреженных матриц // Самара: Самарский гос. университет. 2010. 48 с.
2. *Брумштейн Ю.М.* Использование псевдогидродинамической постановки в задачах фильтрации со свободной поверхностью // Естественные науки, Астрахань: Изд.дом «Астраханский университет». 2004. № 8. С. 125-128.
3. *Бутюгин Д.С., Ильин В.П., Перевозкин Д.В.* Методы параллельного решения СЛАУ на системах с распределенной памятью в библиотеке Krylov // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2012. № 47 (306). С. 22-36.
4. *Джордж А., Лю Дж.* Численное решение больших разреженных систем уравнений // М.: Мир, 1984. 333 с.
5. *Игнатьев А.В., Ромашкин В.Н.* Анализ эффективности методов решения больших разреженных систем линейных алгебраических уравнений // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2008. № 3(6). С. 5.

6. *Ильин В.П.* Проблемы высокопроизводительных технологий решения больших разреженных СЛАУ // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2009. Т. 10. № 1. С. 141-147.
7. *Крон Г.* Исследование сложных систем по частям – диакоптика: Перевод с английского // М.: Наука. 1972. 544 с.
8. *Кочура А.Е.* Декомпозиция и технология разреженных матриц в современных вычислительных проблемах // Труды Международной научно-методической конференции «Математика в вузе». Псков. 1997.
9. *Солнцева М.О., Кухаренко Б.Г.* Применение методов кластеризации узлов на графах с разреженными матрицами смежности в задачах логистики // Труды Московского физико-технического института. 2013. Т. 5. № 3 (19). С. 75-83.
10. *Писсанецки С.* Технология разреженных матриц: Перевод с английского // М.: Мир. 1988. 410 с.
11. *Уилкинсон Дж.Х., Райни С.* Справочник алгоритмов на языке Алгол. Линейная алгебра // М.: Машиностроение. 1976. 390 с.
12. *Эварт Т.Е., Лазарева А.Б.* Алгоритм решения систем линейных алгебраических уравнений с разреженными матрицами // Приволжский научный вестник. 2013. № 12-2 (28). С. 91-92.
13. *Юлдашев А.В., Гатиятуллин М.З.* Сравнительное исследование эффективности ряда библиотек реализующих алгоритмы решения разреженных матриц // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 4 (22). С. 130-134.
14. *Alaghband G.* Parallel sparse matrix solution and performance // *Parallel Computing*. 1995. vol. 21. no. 9. pp. 1407-1430.
15. *Borutzky W.* Bond Graph Methodology: Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models // Springer. 2009. 662 p.
16. *Dehnavi M.M., Fernández D.M., Giannacopoulos D.* Finite-element sparse matrix vector multiplication on graphic processing units // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010. vol. 46. no. 8. С. 2982-2985.
17. *Saad Y.* Iterative methods for sparse linear systems. SIAM. 2003. 528 p.
18. *Sasaoka T., Kawabata H., Kitamura T.* A matlab-based code generator for parallel sparse matrix computations utilizing PSBLAS // *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2007. vol. E90-D. no. 1. P. 2.
19. *Davis T.A., Hu Y.* The university of Florida sparse matrix collection *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* // November 2011. vol. 38. Issue 1. Article no. 1.
20. *Davis T.A.* Direct Methods for Sparse Linear Systems. SIAM, 2006. 217 p.
21. *Tran T.M., Gruber R., Appert K., Wuthrich S.* A direct parallel sparse matrix solver // *Computer Physics Communications*. 1996. vol. 96. no. 2-3. pp. 118-128.

## References

1. Blatov I. A., Kitaeva E. V. *Chislennyye metody dlja razrezhennykh matric* [Numerical methods for sparse matrices]. Samara: Samarskij gos. universitet. 2010. 48 p. (In Russ.).
2. Brumsthejn Ju.M. [Using pseudo hydrodynamic approach to filtering problems with a free surface]. *Estestvennyye nauki – Natural Sciences*. Astrahan':Izd.dom «Astrahanskij universitet». 2004. no 8. pp. 125-128. (In Russ.).
3. Butjugin D.S., Pi'in V.P., Perevozkin D.V. [Methods of parallel solving of LAES on distributed memory systems in a library Krylov]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Vychislitel'naja matematika i informatika – Bulletin of South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2012. no. 47(306). pp. 22-36. (In Russ.).

4. Dzhordzh A., Lju Dzh. *Chislennoe reshenie bol'shikh razrezhennykh sistem uravnenij* [Numerical solution of large sparse systems of equations]. M.:Mir. 1984. 333 p. (In Russ.).
5. Ignat'ev A.V., Romashkin V.N. [Analysis of the effectiveness of methods for solving large sparse systems of linear algebraic equations]. *Internet-Vestnik VolgGASU – Scientific and Technical Multi-Topic Internet Journal of VSUACE*. 2008. no. 3(6). pp. 5. (In Russ.).
6. Il'in V.P. [Problems of highly productive technology of solution of large sparse LAES]. *Vychislitel'nye metody i programirovanie: novye vychislitel'nye tehnologii – Numerical methods and programming: new computing technologies*. 2009. vol. 10. no. 1. pp. 141-147. (In Russ.).
7. Kron G. *Diakoptics: The Piecewise Solution of Large Scale Systems*, MacDonald Publishing. 1963. 166 p. [Russ. ed.: Banah L.Ja., Vlasova A.V., Pavlova I.A., Perminova M.D., Potemkina B.A., Sineva A.V. Issledovanie slozhnykh sistem po chastjam – diakoptika: Perevod s anglijskogo. M.: Nauka. 1972. 544 p.]
8. Kochura A.E. [Decomposition and technology of sparse matrix in modern computing problems]. *Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoi konferencii «Matematika v vuzeh»* [Proceedings of the International Scientific Conference "Mathematics in the University"]. Pskov. 1997. (In Russ.).
9. Solnceva M.O., Kuharenko B.G. [Application of clustering methods nodes on graphs with sparse matrices of adjacency in problems of logistics]. *Trudy Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo institute – Proceedings of MIPT*. 2013. vol. 5. no. 3(19). pp. 75-83. (In Russ.).
10. Pissanecki S. *Tehnologija razrezhennykh matric: Perevod s anglijskogo* [Sparse Matrix Technology: Translated from English]. M.: Mir. 1988. 410 p. (In Russ.).
11. Uilkinson Dzh.H., Rajnsh S. *Spravochnik algoritmov na jazyke Algol. Linejnaja algebra* [Reference book of algorithms in Algol. Linear algebra]. M.:Mashinostroenie, 1976. 390 p. (In Russ.).
12. Jevart T.E., Lazareva A.B. [An algorithm for solving systems of linear algebraic equations with sparse matrices]. *Privolzhskij nauchnyj vestnik – Privolzhskij scientific bulletin*. 2013. no. 12-2(28). pp. 91-92. (In Russ.).
13. Juldashv A.V., Gatijatullin M.Z. [Comparative research of the effectiveness of a number of libraries implementing algorithms for solving sparse matrices]. *Vektor nauki Tol'jattinskogo gosudarstvennogo universiteta – Vector of science TSU*. 2012. no. 4 (22). pp. 130-134. (In Russ.).
14. Alaghband G. Parallel sparse matrix solution and performance. *Parallel Computing*. 1995. vol. 21. no 9. pp. 1407-1430.
15. Borutzky W. *Bond Graph Methodology: Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models*. Springer. 2009. 662 p.
16. Dehnavi M.M., Fernández D.M., Giannacopoulos D. Finite-element sparse matrix vector multiplication on graphic processing units. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010. vol. 46. no 8. pp. 2982-2985.
17. Saad Y. *Iterative methods for sparse linear systems*. SIAM. 2003. 528 p.
18. Sasaoka T., Kawabata H., Kitamura T. A matlab-based code generator for parallel sparse matrix computations utilizing PSBLAS. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2007. vol. E90-D. no. 1. P. 2.
19. Davis T.A., Hu Y. The university of Florida sparse matrix collection *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*. November 2011. vol. 38. Issue 1. Article no 1.
20. Davis T.A. *Direct Methods for Sparse Linear Systems*. SIAM, 2006. 217 p.
21. Tran T.M., Gruber R., Appert K., Wuthrich S. A direct parallel sparse matrix solver. *Computer Physics Communications*. 1996. vol. 96. no 2-3. pp. 118-128.

**Кочура Александр Евгеньевич** — д-р физ.-мат. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ). Область научных интересов: технологии разреженных матриц. Число научных публикаций — 189. kochura36@mail.ru; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 34, +7 -911-961-47-90.

**Kochura Alexander Evgenyevich** — Ph.D., Dr.Sci., professor, St.Petersburg State Polytechnical University. Research interests: technologies of the rarefied matrixes. The number of publications — 189. kochura36@mail.ru; 34, Polytechnical St. Petersburg, 195251, Russia; +7 -911-961-47-90.

**Подколзина Людмила Викторовна** — к-т пед. наук, доцент, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ). Область научных интересов: системы линейных алгебраических уравнений. Число научных публикаций — 36. technolog@zavod-vtuz.ru; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 34, +7-921- 944-88-54.

**Podkolzina Lyudmila Viktorovna** — Ph.D., associate professor, senior teacher, St.Petersburg State Polytechnical University. Research interests: technologies of the rarefied matrixes. The number of publications — 36. technolog@zavod-vtuz.ru; 34, Polytechnical St. Petersburg, 195251, Russia; +7-921- 944-88-54.

**Ивакин Ян Альбертович** — д-р техн. наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: интеллектуализация ГИС. Число научных публикаций — 117. ivakin@oogis.ru; 199178, Санкт-Петербург, 14 линия, 39, +7-911-284-36-20.

**Ivakin Yan Albertovich** — Ph.D., Dr.Sci., associate professor, leading researcher, St. Petersburg institute for informatics and automation of Russian Academy of Sciences. Research interests: Intelegent of GIS. The number of publications — 117. ivakin@oogis.ru; 39, 14th line. St. Petersburg, 195251, Russia; +7-911-284-36-20.

**Нидзиев Иван Иванович** — к-т техн. наук, докторант, Военный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия им. Н.Г.Кузнецова». Область научных интересов: многовариантные расчеты. Число научных публикаций — 29. ivan\_005@mail.ru; 198903, Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Разводная, 15; +7-921-952-37-04.

**Nidziyev Ivan Ivanovich** — Ph.D., Doctoral candidate, Military scientific training center of navy of the N.G. Kuznetsov Naval Academy. Research interests: multiple calculations. The number of publications — 29. ivan\_005@mail.ru; 15, Razvodnaya str. St. Petersburg, Petrodvorets, 198903, Russia; +7-921-952-37-04.

## РЕФЕРАТ

*Кочура А.Е., Подколызина Л.В., Ивакин Я.А., Нидзиев И.И.* **Разработка алгоритма решения систем линейных уравнений с варьируемыми параметрами, использующего разреженность матрицы.**

Многочисленное решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большой размерности (БР) необходимо для целого ряда задач в сфере экономики, моделирования климата, машиностроительных расчетов и пр. Проанализированы достоинства и недостатки прямых и итерационных методов решения СЛАУ БР. В статье предложен новый «прямой» метод (алгоритм) решения СЛАУ с варьируемыми параметрами для матриц БР. В разработанном методе с учетом разреженности матрицы используется информация о решении базовой СЛАУ. Это позволяет в задачах, описываемых СЛАУ с БР, которые необходимо решать многократно, существенно повысить быстроту действия расчетных алгоритмов за счет уменьшения количества вычислительных операций; снизить требования к объемам оперативной памяти ЭВМ. Авторы статьи детально описывают применяемые расчетные схемы, приводят все необходимые матричные уравнения.

## SUMMARY

*Kochura A.E., Podkolzina L.V., Ivakin Y.A., Nidziev I.I.* **Development of algorithm of the decision of systems linear equations with the varied parameters, using the matrix sparseness.**

The repeated decision of linear algebraic equations systems (LAES) with big dimension (BD) is necessary for a number of tasks in spheres of economy, climate modeling, calculations in machine-building and so forth. Merits and demerits of straight and iterative methods for BD LAES are shown. In article is offered the new «direct» method (algorithm) for solution of BD LES with varied parameters. For offered method effectively used basic solution LAES and matrix sparseness information. It allows in the tasks using BD LAES, which need to be solved repeatedly, significantly increase speed of settlement algorithms due to reduction of number of computing operations, to lower requirements for random access memory volumes of computers. Authors of article describe in detail applied settlement schemes, give all necessary matrix equations.

В.М. ШПАКОВ  
**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРАНСФОРМАЦИОННЫХ ПРАВИЛ  
ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНЫХ  
ПРОЦЕССОВ**

---

*Шпаков В.М. Об использовании трансформационных правил для компьютерной реализации непрерывных процессов.*

**Аннотация.** Рассматриваются возможности использования основанного на трансформационных правилах транзитивного подхода для спецификации и компьютерной реализации непрерывных процессов. На примерах показаны приемы преобразования исходных спецификаций процессов в спецификации в виде совокупности трансформационных правил. В качестве исходных рассмотрены спецификации в виде физической модели, структурной схемы динамических звеньев, в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. Приведенные примеры демонстрируют простоту, наглядность и универсальность рассматриваемого подхода. Кратко обсуждаются вопросы реализации процессов, специфицированных с помощью правил. Полученные модельные реализации процессов оцениваются с помощью аналитических методов, а также сравниваются с численными решениями, найденными с помощью Matlab и MathCad.

**Ключевые слова:** представление знаний, компьютерное моделирование, дифференциальные уравнения, автоматическое управление.

*Shpakov V.M. About use of transformational rules for computer implementation of continuous processes.*

**Abstract.** The possibility to use based on the transformational rules transitive approach for the specification and the computer implementation of continuous processes is considered. The examples show techniques of the processes initial specifications conversion in the specifications as sets of transformation rules. As starting specifications in the form of a physical model, the block diagram of dynamic links, in the form of ordinary differential equations are considered. These examples demonstrate the simplicity, clarity and versatility of this approach. Some problems of implementation of the processes specified by using rules are briefly discussed. The resulting model implementations of processes are evaluated using analytical methods and compared with the numerical solutions found using Matlab and MathCad.

**Keywords:** knowledge representation, computer simulation, differential equations, automatic control.

---

**1. Введение.** Потребность в компьютерной реализации непрерывных процессов существует при имитационном моделировании динамических систем, а также при разработке программного обеспечения современных систем управления, например, для реализации эталонных процессов и процессов управления. Если в первом случае возможна реализация процессов, как в реальном, так и в модельном масштабе времени, то во втором случае — только в реальном времени. Имитационные модели

технологического оборудования широко используются для отладки и обслуживания систем управления технологическими процессами.

Традиционно спецификация непрерывных процессов производится с помощью дифференциальных уравнений, на основе которых создается математическая модель процессов. Разработано много дифференциальных уравнений, специфицирующих определенные процессы, имеющие значение для науки и техники. Другой метод спецификации процессов основан на использовании передаточных функций и составлении структурных схем, определяющих взаимодействие друг с другом элементарных динамических звеньев, функциональных преобразователей и типовых нелинейностей. Этот метод широко используется для анализа и проектирования систем автоматического управления. Реализация процессов, специфицированных указанными методами, производится с помощью методов численного решения дифференциальных уравнений.

Специфицировать процессы можно также с помощью физической модели динамической системы. Такая модель представляет собой совокупность функциональных и интегро-дифференциальных отношений между состояниями процессов, а также имеющихся пространственно-временных и технологических ограничений.

Реализацию процессов, заданных любым из указанных способов можно производить с помощью транзитивного подхода к представлению процессов. На основе этого подхода разработана методика спецификации гибридных процессов [1, 2]. Она представляет собой гибридный автомат, функции перехода которого заданы с помощью трансформационных (продукционных) правил. Эти правила на основании текущих значений состояний процессов и специфицированных функциональных и интегро-дифференциальных отношений определяют состояния процессов через определенный промежуток времени. Непрерывные процессы являются частными случаями гибридных процессов, они также могут быть специфицированы с помощью трансформационных правил. Реализация процессов, специфицированных с помощью правил, производится интерпретатором, исполняющая процедура которого сканирует в цикле списки правил и вычисляет текущие значения логических и вещественных переменных, представляющих состояния процессов. Спецификация процессов с помощью правил обладает, на наш взгляд, рядом достоинств. Язык спецификации ориентирован на специалистов в предметной области, является достаточно

выразительным, допускает простую модификацию спецификаций и их эффективную реализацию. Спецификации процессов, заданные физическими моделями систем, выполненные с помощью структурных схем или дифференциальных уравнений, могут достаточно просто быть преобразованы в спецификации в виде трансформационных правил, а процессы реализованы с помощью интерпретатора. Цель данной статьи состоит в демонстрации на примерах приемов преобразования указанных исходных спецификаций в спецификации в виде трансформационных правил и реализации процессов на их основе.

Далее кратко излагаются необходимые для понимания основные положения транзитивного подхода к реализации гибридных процессов. Текущее состояние совокупности гибридных процессов задается множеством вещественных переменных  $X$ , представляющих непрерывные составляющие, и множеством логических переменных  $W$ , представляющих дискретные составляющие процессов и предикаты от непрерывных состояний. В данной статье нас будут интересовать только непрерывные составляющие процессов. Для их спецификации необходимо задать функцию перехода следующего типа:  $W \times X \rightarrow X$ . Эта функция определяется трансформационными правилами, условная часть которых содержит логическую переменную, представляющую ситуацию или режим, а исполнительная часть — транзитивное отношение между текущим и следующим состояниями процесса. В случае свободного одномерного непрерывного процесса отношение следования или транзитивное отношение представляет собой бинарное отношение на множестве вещественных чисел вида  $\tau(y, y')$  или  $y' = \tau(y)$ , где  $y$  — текущее состояние процесса, а  $y'$  — следующее состояние процесса. Транзитивное отношение  $\tau$  определяется параметрами динамического звена и длительностью интервала времени  $\Delta t$  между  $y$  и  $y'$ . В случае вынужденного процесса оно также зависит от внешнего воздействия  $x$ . Для спецификации зависимости непрерывных состояний от логики развития гибридного процесса, процедуры вычисления этих отношений включаются в исполнительные части правил, условными частями которых являются требуемые значения соответствующих режимов. Эти правила имеют вид:

$$S_j \rightarrow x'_k = \tau_k(x_k, x), \quad x_k, x \in X, \quad (1)$$

где  $S_j$  — условие, определяющее режим,  $\tau_k$  и  $x_k$  —

соответствующие отношение и состояние,  $x$  — состояние возмущающего процесса. При спецификации непрерывных процессов в качестве условия используется логическая константа, имеющая значение *True*.

В СПИИРАН разработан исследовательский прототип интерпретатора трансформационных правил [3]. Он содержит редакторы для формирования векторов состояния процессов и списков правил трансформации этих состояний. Для обработки правил (1) в интерпретаторе имеется набор процедур реализации арифметических операторов, элементарных функций и транзитивных отношений для элементарных процессов. В частности имеется процедура для реализации интеграторов, использующая метод Эйлера. Рассматриваемые в следующих разделах процессы были реализованы с помощью этого интерпретатора.

С помощью интерпретатора возможна реализация процессов, как в модельном, так и в реальном масштабе времени. В случае модельного времени величина приращения времени задается пользователем. Она определяет точность реализации процесса. При этом реальное время реализации зависит от количества правил и быстродействия интерпретатора. В случае реального времени в конце каждого оборота цикла сканирования правил измеряется его длительность и это значение используется в правилах для вычисления новых значений состояний процессов. При этом от количества правил и быстродействия интерпретатора зависит точность реализации процессов.

Точность определяется погрешностью используемого численного метода интегрирования и длительностью интервала продвижения времени. В случае реального времени использование сложных методов численного интегрирования приводит к увеличению интервала, что уменьшает точность. Современные компьютеры обладают высокой производительностью. Обработка сотен правил на персональном компьютере производится за единицы микросекунд, что позволяет обеспечить приемлемую точность реализации многих процессов в реальном масштабе времени. На точность реализации некоторое влияние оказывает последовательность правил в списке. Правила обрабатываются по порядку с начала списка. Для повышения точности надо, чтобы правила вычисления подынтегральных функций предшествовали правилам, вычисляющим интегралы. Для качественной оценки влияния на точность интегрирования последовательности правил было проведено моделирование процесса  $y(t) = 80 \int t dt = 40 \cdot t^2$  при очень большом шаге

интегрирования ( $dt=0,1$  сек) и различной последовательности правил вычисления подынтегральной функции и интеграла. Для сравнения этот же процесс был реализован при шаге  $dt=1$  мкс. Этот процесс можно принять в качестве эталонного. Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

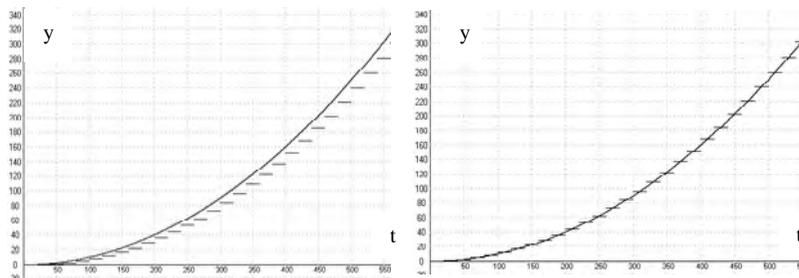


Рис. 1. К оценке погрешности интегрирования

Эталонный процесс изображен сплошной линией, а исследуемый — в виде последовательности ступенек длиной 0,1 секунды. В левой части рисунка приведен процесс, реализованный списком правил, при котором интеграл вычисляется раньше, чем подынтегральная функция. В правой части рисунка представлен график процесса, реализованного правилами, в которых вычисление подынтегральной функции предшествовало вычислению интеграла. В первом случае погрешность складывается из высоты ступеньки и некоторой накопленной погрешности. Во втором случае ступенька расположена примерно симметрично относительно эталонного процесса. Величина ступеньки в обоих случаях пропорциональна текущей скорости процесса и величине интервала. Можно сделать вывод о том, что во втором случае погрешность как минимум в два раза меньше, чем в первом случае.

**2. Реализация процессов, заданных физической моделью.** В качестве примера рассмотрим реализацию процессов, возникающих при центральном ударном взаимодействии двух абсолютно упругих шаров (пример 23.2 [4]). Пусть шары имеют одинаковые радиусы  $R_1=R_2=0,1$  и одинаковые коэффициенты упругости  $k_1=k_2=k=10000$ . Масса первого шара равна  $m_1=3$ , а масса второго —  $m_2=1$ . Центр тяжести первого шара находится в начале оси абсцисс ( $x_1(0)=0$ ) и имеет скорость  $V_1(0)=10$  в положительном направлении оси абсцисс. Центр тяжести второго шара находится в точке с абсциссой

$x_2(0)=R_1+R_2=0,2$  и имеет скорость  $V_2(0)=-10$ . Из сказанного следует, что шары находятся в начале процесса взаимодействия. В результате взаимодействия возникают две силы  $F_1$  и  $F_2$ , равные по величине и противоположные по направлению. Под действием этих сил первый шар начинает замедляться, а второй — ускоряться. Величина каждой из сил пропорциональна суммарной деформации шаров, т.е.  $F_1=-F_2=-k \cdot ((R_1+R_2)-(x_2-x_1))$ . Силы определяют ускорения шаров ( $a_1$  и  $a_2$ ), а скорости и координаты определяются интегралами от ускорения и скорости, соответственно. Приведенное описание можно назвать физической моделью рассматриваемых процессов. На его основании нетрудно создать спецификацию процессов в виде совокупности трансформационных правил. Такая спецификация приведена на рисунке 2.

Nº	Переменная	Процедура	Козфф.	Аргумент	Аргумент
1	a1	Деление	1.00	F1	m1
2	V1	Интеграл	1.00	a1	
3	-X1	Интеграл	-1.00	V1	
4	a2	Деление	1.00	F2	m2
5	V2	Интеграл	1.00	a2	
6	X2	Интеграл	1.00	V2	
7	-Distance	Сумма	-1.00	X2	-X1
8	R1 + R2	Сумма	1.00	R1	R2
9	Delta	Сумма	1.00	R1 + R2	-Distance
10	F1	Пропорциональная	-10000.00	Delta	
11	F2	Пропорциональная	-1.00	F1	

Рис. 2. Правила, специфицирующие процессы при ударном взаимодействии двух шаров

Правила представлены в формате редактора правил разработанного интерпретатора. Первое правило вычисляет текущее значение ускорения первого шара, второе и третье — его скорость и координату, соответственно. 4, 5, 6 правила делают то же самое для второго шара. Седьмое правило вычисляет текущее расстояние (*Distance*) между центрами масс шаров, а девятое — текущую суммарную деформацию (*Delta*). Десятое правило вычисляет текущее значение силы  $F_1$ , действующей на первый шар. Коэффициент в этом правиле равен коэффициенту упругости материала шаров. Сила  $F_2$ , действующая на второй шар, равна по величине и противоположна по направлению первой силе. Запуская эти правила на обработку интерпретатором, получаем процессы изменения всех переменных: координат, скоростей, ускорений и сил.

На рисунке 3 приведены графики изменения скоростей шаров и возникающих сил. Масштаб визуализации скоростей равен 10.

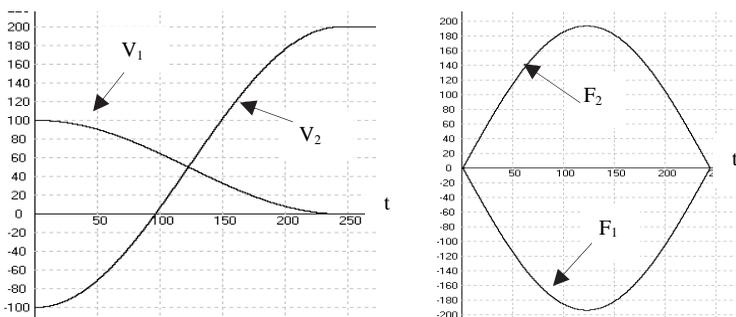


Рис. 3. Графики процессов изменения скоростей шаров и возникающих сил

При выбранных значениях начальных скоростей и масс шаров скорость первого шара уменьшается до нуля, а скорость второго шара меняет знак и по модулю увеличивается вдвое. Обе скорости в дальнейшем остаются постоянными. Возникающие силы равны по величине и противоположны по знаку. Количество движения до взаимодействия  $m_1 \cdot V_1(0) + m_2 \cdot V_2(0)$  и после  $m_1 \cdot V_1(0,02) + m_2 \cdot V_2(0,02)$  равны -20. С полученной моделью можно проводить эксперименты, изменяя массы шаров, начальные скорости и коэффициент упругости. В экспериментах всегда выполняются законы сохранения количества движения и сохранения энергии.

Использование физической модели упрощает реализацию процессов, так как исключает необходимость разработки математической модели. При этом также существенно упрощаются модификация и расширение модели процессов. Наглядность в данном случае повышается за счет того, что вместо абстрактных математических координат используются реальные физические переменные.

**3. Реализация процессов, специфицированных с помощью структурных схем элементарных динамических звеньев.** Рассмотрим особенности формирования трансформационных правил и реализации процессов, заданных структурной схемой, приведенной на рисунке 4. Схема представляет собой последовательное соединение двух динамических звеньев. Первое состоит из двух интеграторов, охваченных общей отрицательной обратной связью и отрицательной обратной связью по скорости. Это звено специфицирует затухающий колебательный процесс. Вторым звеном является охваченный

отрицательной обратной связью интегратор. Оно определяет затухающий аperiodический процесс.

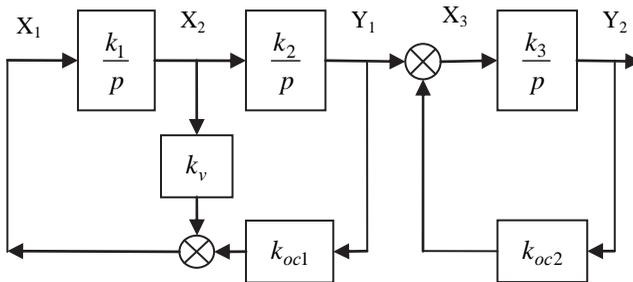


Рис. 4. Структурная схема процессов

Как видно из схемы реализация специфицируемых ею процессов может быть произведена путем соединения интегрирующих, суммирующих и пропорциональных элементов. При спецификации процессов с помощью правил каждый элемент схемы представляется правилом, реализующим соответствующую процедуру. Соединение процедур производится за счет того, что выходная переменная одной процедуры используется в качестве аргумента другой. На рис. 5 приведены правила, соответствующие схеме рис. 4. Имена переменных в правилах совпадают с именами, использованными на схеме.

Первое правило формирует процесс обратной связи по скорости с  $k_v = 0,02$ . Второе — процесс основной обратной связи с  $k_{oc1} = 1$ . Третье правило осуществляет суммирование обеих обратных связей и инвертирование суммарного значения, тем самым вычисляет значение  $x_1$  на входе первого интегратора. Четвертое правило производит интегрирование с  $k_1 = 50$  и определяет значение  $x_2$  на входе второго интегратора. Пятое правило осуществляет интегрирование с  $k_2 = 40$  и вычисляет значение  $y_1$  состояния процесса на выходе первого звена. Следующие три правила аналогичным образом специфицируют аperiodическое звено с  $k_3 = 10$  и  $k_{oc2} = 0,1$ . При этом выходной сигнал первого звена  $y_1$  используется в седьмом правиле для формирования процесса  $x_3$  на входе третьего интегратора. Последнее правило вычисляет состояние  $y$  процесса на выходе схемы.

№	Переменная	Процедура	Кэф.ф.	Аргумент 1	Аргумент 2
1	$K_v \cdot X_2$	Пропорциональная	0.02	$X_2$	
2	$K_{oc1} \cdot Y_1$	Пропорциональная	1.00	$Y_1$	
3	$X_1$	Сумма	-1.00	$K_v \cdot X_2$	$K_{oc1} \cdot Y_1$
4	$X_2$	Интеграл	50.00	$X_1$	
5	$Y_1$	Интеграл	40.00	$X_2$	
6	$K_{oc2} \cdot Y$	Пропорциональная	-0.10	$Y$	
7	$X_3$	Сумма	1.00	$Y_1$	$K_{oc2} \cdot Y$
8	$Y$	Интеграл	10.00	$X_3$	

Рис. 5. Совокупность правил для реализации процессов, специфицированных структурной схемой

В данном случае процессы, определяемые схемой, описываются обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, аналитические решения которых находятся достаточно просто. Применяя формулу для замыкания системы отрицательной обратной связью к обоим контурам первого звена, находим его передаточную функцию в следующем виде:

$$\Phi_1(p) = \frac{k_1 \cdot k_2}{p^2 + k_1 \cdot k_v \cdot p + k_1 \cdot k_2 \cdot k_{oc1}}.$$

Вид переходного процесса в данном звене определяется корнями знаменателя приведенной передаточной функции  $\lambda_{1,2} = -0,5 \cdot k_1 \cdot k_v \pm \sqrt{(0,5 \cdot k_1 \cdot k_v)^2 - k_1 \cdot k_2 \cdot k_{oc1}}$  или для выбранных значений коэффициентов  $\lambda_{1,2} = -0,5 \pm \sqrt{-1999,75} = -0,5 \pm j \cdot 44,72$ . Соответствующий найденным значениям корней переходный процесс представляет собой колебательный процесс с круговой частотой  $\omega_1 = 44,72$  (период колебаний  $T = 0,14$  с) и амплитудой, изменяющейся по экспоненте с показателем  $\alpha = -0,5 \cdot t$ . На рисунке 6 представлен процесс изменения  $y_1$ , реализованный с помощью правил (рис. 5) для начального значения  $y_1(0) = 250$  и нулевых начальных значений остальных переменных. Измерение параметров этого процесса показало, что они хорошо совпадают с расчетными значениями.

Применяя формулу для замыкания системы ко второму звену, получаем его передаточную функцию  $\Phi_2(p) = \frac{k}{1 + T \cdot p}$ , где

$k = \frac{1}{k_{oc2}} = 10$  и  $T = \frac{1}{k_3 \cdot k_{oc2}} = 1$ . Амплитудная частотная характеристика

этого звена имеет следующий вид:  $\Phi_2(\omega) = \left| \frac{k}{1 + T \cdot j\omega} \right| = \frac{k}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}}$ .

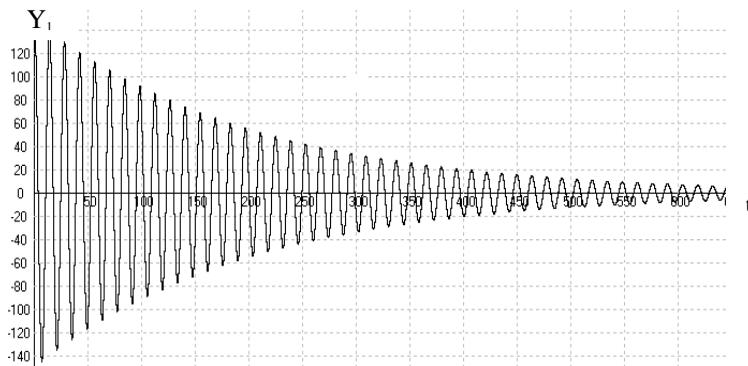


Рис. 6. График процесса  $y_1(t)$  на выходе колебательного звена

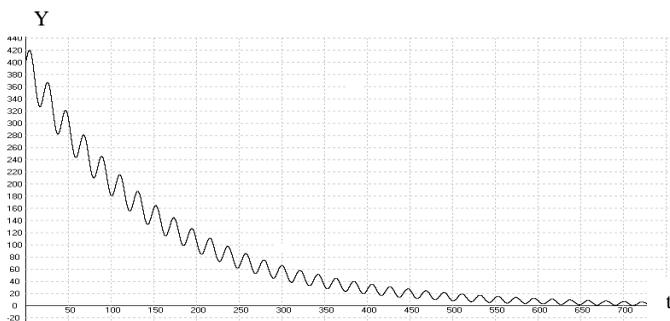


Рис. 7. График процесса  $y(t)$  на выходе схемы на рисунке 4

Для выбранных значений параметров и найденного значения частоты входного процесса  $\Phi_2(\omega_1) = 0,2236$ . Это значение является коэффициентом пропорциональности между амплитудами колебательных процессов на входе и выходе этого звена. На рисунке 7 приведен процесс на выходе схемы (рис. 4) для начальных значений  $y_1 = 150$  и  $y = 400$ . Процесс представляет собой затухающие колебания, происходящие относительно экспоненты:

$y=150 \cdot 0,2236 \cdot e^{-0,5t} \cdot \sin \omega_1 t + 400 \cdot e^{-t}$ , что соответствует приведенным ранее рассмотрениям.

**4. Реализация процессов, специфицированных дифференциальными уравнениями.** Рассмотрим вначале простейшее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = y. \quad (2)$$

Процессы, специфицированные этим уравнением, могут быть реализованы с помощью двух интеграторов. Соответствующие правила приведены на рисунке 8.

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1
1	dy/dt	Интеграл	1.00	y
2	y	Интеграл	1.00	dy/dt

Рис. 8. Правила для реализации процессов, заданных уравнением (2)

Первое правило осуществляет интегрирование основной переменной и определяет ее первую производную. Второе правило интегрирует эту производную и находит основную переменную. Общее решение рассматриваемого уравнения имеет вид:  $y(t) = C_1 e^t + C_2 e^{-t}$ . Его можно использовать для реализации процессов, состояния которых изменяются по экспоненциальным законам. Значения констант определяются начальными условиями:  $y(0) = C_1 + C_2$ ,  $y'(0) = C_1 - C_2$ . Меняя начальные условия можно получать различные экспоненциальные зависимости. Так для получения процесса  $y(t) = e^t$  надо, чтобы  $C_1 = 1$  и  $C_2 = 0$ , а для этого необходимо установить  $y(0) = 1$  и  $y'(0) = 1$ . Для реализации процесса  $y(t) = 200 e^{-t}$  надо, чтобы  $C_1 = 0$  и  $C_2 = 200$ . Такой процесс будем иметь при  $y(0) = 200$  и  $y'(0) = -200$ . Полученные графики этих процессов представлены на рисунке 9. Параметры кривых полностью соответствуют приведенным решениям уравнения.

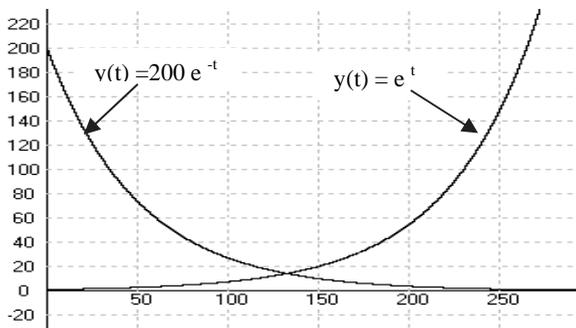


Рис. 9. Графики процессов, реализованных правилами (рис. 8)

К настоящему времени разработано и исследовано значительное количество обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в различных динамических системах, представляющих интерес для науки и техники. Компьютерная реализация этих процессов также, очевидно, может представлять интерес. Она достаточно просто может быть произведена с помощью трансформационных правил. Формирование таких правил рассмотрим на примере реализации процессов, специфицированных уравнением Ван-дер-Поля. Это нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение 2-го порядка, описывающее свободные автоколебания нелинейной колебательной системы (осциллятора Ван-дер-Поля). Оно находит применение в физике, биологии, в сейсмологии, имеет следующий вид:

$$\frac{d^2y}{dt^2} - \mu(1 - y^2) \cdot \frac{dy}{dt} + y = 0, \quad (3)$$

где  $y$  — координата точки, зависящая от времени,  $\mu$  — некий коэффициент, характеризующий нелинейность и степень затухания колебаний. Для реализации процессов, заданных с помощью дифференциального уравнения, необходимо из уравнения найти выражение для старшей производной, сформировать правила, вычисляющие текущее значение этой производной, затем последовательно использовать правила, реализующие процедуру интегрирования, для вычисления текущих значений всех более низких производных и самой функции. В случае рассматриваемого уравнения

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \mu \cdot (1 - y^2) \cdot \frac{dy}{dt} - y.$$

На рисунке 10 приведены правила, позволяющие реализовать процесс, описываемый уравнением (3)

при  $\mu=1$ . Имена переменных в правилах совпадают с идентификаторами, использованными в уравнении.

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2
1	$-y^2$	Умножение	-1.00	$y$	$y$
2	$(1 \cdot y^2)$	Сумма	1.00	Const 1	$-y^2$
3	$(1 \cdot y^2) \cdot dy/dt$	Умножение	1.00	$(1 \cdot y^2)$	$dy/dt$
4	$dy^2/dt^2$	Сумма	1.00	$(1 \cdot y^2) \cdot dy/dt$	$-y$
5	$dy/dt$	Интеграл	1.00	$dy^2/dt^2$	
6	$y$	Интеграл	1.00	$dy/dt$	
7	$-y$	Пропорциональная	-1.00	$y$	

Рис. 10. Правила для реализации процессов, заданных уравнением (3)

Первое правило вычисляет текущее инвертированное значение квадрата функции (основной переменной), второе и третье — формируют первый член выражения для второй производной, а четвертое полностью вычисляет это выражение. Следующее правило интегрирует это выражение и находит значение первой производной. Шестое правило вычисляет интеграл от первой производной, то есть находит значение функции. На рисунке 11 представлены графики процессов, реализованных с помощью трансформационных правил (рис. 10) для  $y(0)=2$  и нулевых начальных значений производных, тех же начальных условий и того же значения параметра, полученным с помощью Mathcad и приведенным на рис 3 в работе [5].

Аналогичным образом с помощью трансформационных правил можно реализовать процессы, специфицированные системами обыкновенных дифференциальных уравнений. Покажем это на примере реализации процессов, заданных системой Лоренца, представляющей собой систему трех уравнений первого порядка:

$$\frac{dx}{dt} = \sigma \cdot (y - x), \quad \frac{dy}{dt} = \rho \cdot x - y - x \cdot z, \quad \frac{dz}{dt} = x \cdot y - \beta \cdot z.$$

Здесь  $x$ ,  $y$  и  $z$  — переменные системы,  $t$  — время, а  $\sigma$ ,  $\rho$ ,  $\beta$  — параметры системы. Эта система уравнений была разработана Эдвардом Лоренцом в 1963 году и использовалась им в качестве математической модели процессов атмосферной конвекции. Позже подобные системы были получены при исследовании электрических цепей, электродвигателей, лазеров и химических реакций. При разработке трансформационных правил, соответствующих системе

уравнений, вначале формируются правила для вычисления переменных, представляющих правые части уравнений. Затем эти переменные используются в качестве подынтегральных функций для реализации переменных системы.

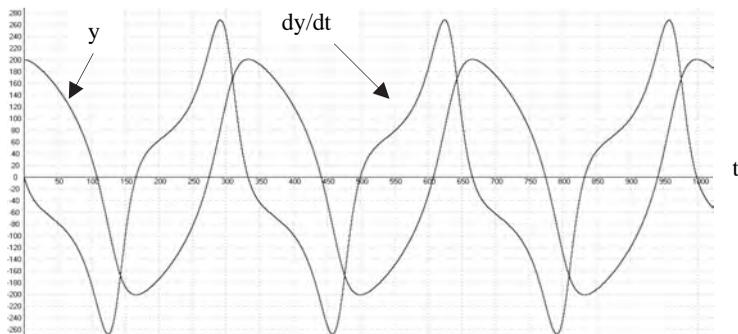


Рис. 11. Графики процессов, специфицированных уравнением (3)

На рисунке 12 приведены правила реализации процессов системы Лоренца для следующих значений параметров:  $\sigma=10$ ,  $\rho=28$ ,  $\beta=2,666667$ .

№	Перемен	Процедура	Козэф.	Аргумент	Аргумент	Ситуаци	имя пара	значение
1	$x * z$	Умножение	1.00	x	z	EverTrue		
2	$\{y + x * z\}$	Сумма	-1.00	y	$x * z$	EverTrue	2-ой коэф	1.00
3	$x * y$	Умножение	1.00	x	y	EverTrue		
4	$dx / dt$	Сумма	10.00	y	x	EverTrue	2-ой коэф	-1.00
5	$dy / dt$	Сумма	1.00	$\{y + x * z\}$	x	EverTrue	2-ой коэф	28.00
6	$dz / dt$	Сумма	1.00	$x * y$	z	EverTrue	2-ой коэф	-2.666667
7	x	Интеграл	1.00	$dx / dt$		EverTrue		
8	y	Интеграл	1.00	$dy / dt$		EverTrue		
9	z	Интеграл	1.00	$dz / dt$		EverTrue		

Рис. 12. Правила для реализации процессов, заданных системой уравнений Лоренца

Первые три правила выполняют вспомогательные арифметические операции с переменными системы. Следующие три правила вычисляют производные от переменных системы, соответствующие трем правым частям уравнений, а три последних правила их интегрируют и вычисляют переменные системы. При запуске этих правил на обработку интерпретатором реализуются процессы изменения всех переменных системы. Визуализация изменения  $x$  представлена на рисунке 13.



Рис. 13. График процесса  $x(t)$  системы уравнений Лоренца

Масштабный коэффициент визуализации по оси ординат равен 10. При запуске на реализацию процесса были установлены следующие начальные значения переменных:  $x=1$ ,  $y=1$ ,  $z=10$ . Полученный график процесса совпадает с графиком решения данной системы уравнений, полученного с помощью Matlab при тех же начальных условиях и приведенного на рисунке 4.9 в работе [6].

**5. Заключение.** Рассмотрена спецификация непрерывных процессов с помощью совокупностей трансформационных правил. На примерах показано, что данный подход может быть эффективно использован в случаях, когда исходные знания о развитии процессов представлены в виде физических моделей, структурных схем элементарных динамических звеньев или в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом показано, что рассматриваемая спецификация обладает наглядностью, является достаточно простой и универсальной. Простота и наглядность наиболее четко проявляются при использовании физической модели. Такие свойства спецификации как простота и наглядность обеспечивают эффективность процессов отладки и модификации компьютерных программ реализации процессов. Универсальность спецификации делает возможным ее применение в случаях, когда знания о динамике частей системы представлены в различных формах.

Что касается реализации процессов, то разработка редактора и интерпретатора правил является тривиальной программистской задачей. Их создание требует небольших затрат времени программиста средней квалификации. Текстовая и графическая визуализации процессов также являются тривиальными задачами. Если имеется необходимость в анимации поведения динамической системы, то в каждом конкретном случае необходима разработка уникальной

подпрограммы. По-видимому, требуется более детальное рассмотрение вопросов оценки погрешностей реализации процессов данным способом.

### Литература

1. *Шпаков В.М.* Ситуационные спецификации имитационных моделей гибридных реактивных систем // Труды СПИИРАН. 2002. Вып. 1, том 2. С. 212-222.
2. *Шпаков В.М.*, Исполняемые спецификации транзитивных моделей технологических процессов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 3. С. 38-45.
3. *Шпаков В.М.* Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // Сборник докладов конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика”, Санкт-Петербург, 19 – 21 октября 2005. Т.П. С. 292–295.
4. *Старжинский В.М.* Теоретическая механика // М.; Наука, 1980. 404 с.
5. *Левцкий А.А.* Основы численных методов. URL: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/levitsky/index.asp>.
6. Scheinerman E. R. Invitation to dynamical systems // Prentice Hall. 1995. 373 p.

### References

1. Shpakov V.M. [Situational specifications of simulation models of hybrid reactive systems]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceeding*. 2002. no. 1. Issue 2. pp. 212-222.
2. Shpakov V.M. [Executable specifications of transitive models of technological processes]. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie- Mechatronics, Automation, Control*. 2004. no. 3. pp. 38-45.
3. Shpakov V.M. [Prototype of simulation environment structured set of interacting processes]. *Sbornik докладov konferencii “Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika”, Sankt-Peterburg, 19 – 21 oktjabrja 2005* [Simulation. Theory and practice: Collected papers]. 2005. vol. 2. pp. 292–295.
4. Starzhinskij V.M. *Teoreticheskaja mehanika* [Theoretical mechanics]. М.; Nauka, 1980. 404 p
5. Levickij A.A. *Osnovy chislennyh metodov* [Fundamentals of numerical methods]. Accessed at: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/levitsky/index.asp>.
6. Scheinerman E. R. Invitation to dynamical systems. Prentice Hall. 1995. 373 p.

**Шпаков Владимир Михайлович** — к-т техн. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: автоматическое управление, искусственный интеллект, логическое программирование, экспертные системы, поддержка принятия решений. Число научных публикаций — 69. [vlad@iias.spb.su](mailto:vlad@iias.spb.su); СПИИРАН, 14-я линия В.О, д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; п.т. +7(812)328-8071, факс +7(812)328-4450.

**Shpakov Vladimir Michajlovich** — Ph.D., associate professor, senior researcher, laboratory of integrated systems for automation, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: automatic control, artificial intelligence, logic programming, expert systems, decision making support. The number of publications: — 69. [vlad@iias.spb.su](mailto:vlad@iias.spb.su); SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-8071, fax +7(812)328-4450.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-00015-а).

**Acknowledgements.** This research is supported by RFBR (grant #12-01-00015-а).

## РЕФЕРАТ

### **Шпаков В.М. Об использовании трансформационных правил для компьютерной реализации непрерывных процессов.**

Отмечается, что существует потребность в реализации непрерывных процессов как в модельном, так и в реальном масштабах времени. Статья посвящена рассмотрению метода спецификации и компьютерной реализации непрерывных процессов, основанного на применение транзитивного подхода к формализации знаний о развитии процессов. В основе подхода находится математическая модель гибридного автомата, функции перехода которого задаются с помощью трансформационных (продукционных) правил, определяющих транзитивное отношение между текущими и следующими состояниями процессов. Рассматриваемый метод ориентирован на специалистов в исследуемой предметной области, является достаточно простым и наглядным, допускает эффективную компьютерную реализацию процессов.

Основным содержанием статьи является рассмотрение особенностей формирования трансформационных правил в случаях, когда исходные знания о динамике процессов представлены в различных формах. На примере спецификации процессов, возникающих при ударном взаимодействии двух упругих шаров, показана возможность реализации физической модели процессов. Правила в этом случае формируются на основании физических законов и геометрических отношений. Получены графики процессов изменения скоростей шаров и сил взаимодействия. Для полученных процессов выполняются законы сохранения.

Способы формирования правил в случае, когда динамика задана структурной схемой соединения динамических звеньев, показана на примере спецификации последовательного соединения колебательного и апериодического звеньев. При этом правила специфицируют последовательное соединение интеграторов и соответствующие отрицательные обратные связи. Представлены процессы на выходе колебательного звена и на выходе схемы. Параметры полученных процессов соответствуют оценкам, найденным аналитическими средствами.

Три последних примера иллюстрируют способы составления правил реализации процессов для случаев, когда исходные знания представлены в виде дифференциальных уравнений. Рассмотрено уравнение Ван-дер-Поля. Уравнение разрешается относительно старшей производной. Сначала формируются правила, вычисляющие эту производную. Затем с помощью интеграторов реализуются остальные производные и сама функция. Реализованы процессы изменения функции и ее первой производной. Графики совпадают с численным решением этого уравнения, полученным с помощью MathCad. Аналогичным образом составляются правила и в случае системы дифференциальных уравнений. В качестве примера рассмотрена система уравнений Лоренца. Реализованный процесс также совпадает с численным решением системы уравнений, найденным с помощью Matlab.

## SUMMARY

### *Shpakov V.M.* **About use of transformational rules for computer implementation of continuous processes.**

It is noted that there exists a need for the implementation of continuous processes in the model and in real time. The article discusses the method of continuous processes specification and the computer implementation based on the use of the transitive approach to the formalization of knowledge about the processes development. The approach is based on the mathematical model of hybrid automata, whose transition functions are specified by the transformation (production) rules that define a transitive relation between the current and the following process states. The method in question is aimed at professionals in the area of concern. It is quite simple and intuitive, allows an efficient computer processes implementation.

The main content of the article is to produce the methodology of the transformation rules formation in cases where the initial knowledge about the dynamics of the processes is presented in various forms. On an example of specification of processes occurring during the shock interaction of two elastic spheres, the possibility of the implementation of a physical model of processes is shown. The rules in this case are formed on the basis of physical laws and geometric relationships. Diagrams of the processes of balls speed and interaction forces changes are gotten. Conservation laws hold for the resulting processes.

Method of the rules forming in a case where the dynamic is given by means of a block diagram of the dynamic unit combination is shown by the example of the oscillatory and aperiodic units serial connection specification. In this the rules specify the serial connection of integrators and their corresponding negative feedbacks. Processes at the output of the oscillatory unit and at the circuit output are presented. Parameters of derived processes are consistent with estimates found by analytic means.

The third example shows the procedure for drawing up rules for implementation of processes for the case where the initial knowledge is presented as a differential equation. An equation of Van-der-Pol is considered. Equation must be solved with regard to the highest derivative. First, rules to calculate this derivative are formed. Then with help of integrators the remaining derivatives and the function itself are realized. Diagrams of the processes of function and its first derivative change are received. The diagrams coincide with the numerical solution of this equation using MathCad. Similarly, the rules are drawn up in case of a system of differential equations. As an example, a system of Lorenz equations is considered. The resulting process is also consistent with the numerical solution. The versatility of the specification makes it possible to use it in cases where the knowledge about the dynamics of the system parts presented in different forms.

Н.С. КОЗЫРЕНКО, Р.В. МЕЩЕРЯКОВ, И.А. ХОДАШИНСКИЙ,  
Н.Ю. АНУФРИЕВА  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ  
ЧЕЛОВЕКА**

---

*Козыренко Н.С., Мещеряков Р.В., Ходашинский И.А., Ануфриева Н.Ю.* **Математическое и алгоритмическое обеспечение оценки состояния здоровья человека.**

**Аннотация.** В статье рассматриваются новые подходы к оценке состояния здоровья человека на основе интегрального показателя. Описана математическая модель для расчета введенного показателя. Проведена апробация модели и показателя на пациентах лечебного учреждения здравоохранения.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, алгоритм, здоровье.

*Kozyrenko N.S., Meshcheryakov R.V., Hodashinsky I.A., Anufrieva N.Y.* **Mathematical model and algorithms of people health evaluation.**

**Abstract.** In article new approaches to the assessment of people health based on integrated indicator are considered. Mathematical model of integrated indicator calculation is described. The testing of the proposed model and the indicator was conducted with the patients of medical health care institutions.

**Keywords:** mathematical modeling, algorithm, health.

---

**1. Введение.** Наиболее общая схема функционирования систем оценки качества здоровья пациента отображена на рисунке 1 и заключается в следующем: пользователь (пациент) регистрирует события диагностики с помощью датчиков или опросников; средствами вычислительной техники производится обработка полученных данных; оповещение о требующих внимания случаях; отправка результатов обработки курирующему врачу.

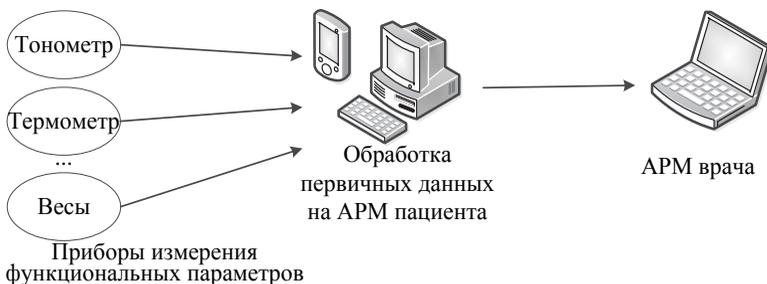


Рис. 1. Схема системы удаленного мониторинга пациента

Реализация подобных систем предоставляет возможность оперативного взаимодействия пациента и курирующего специалиста и упрощает эту процедуру отдельным категориям граждан, для которых самостоятельное посещение врача затруднительно.

Как правило, основой оценки состояния человека является субъективная оценка врача, даваемая им на основе анализа информации о состоянии подсистем организма по отточенным многолетним опытом методам диагностики. В этом случае, специалисту необходимо предоставление ряда функциональных показателей и проработка схем их защищенной передачи.

Предлагается решение, позволяющее скрыть конкретные показатели здоровья человека, не снизив при этом информативности об общем состоянии пациента. Это формализация процесса принятия решения о состоянии здоровья автоматизированной системой на стороне клиента.

Таким образом, целью работы является разработка численного метода и алгоритмов оценки уровня здоровья и качества жизни человека по показателю здоровья для реализации автоматизированной системы удаленного мониторинга пациента с учетом обеспечения информационной безопасности обрабатываемых в системе персональных данных.

Следовательно, необходимо учитывать следующие ограничения:

- осуществление контроля состояния человека без дорогостоящего специализированного медицинского оборудования;
- возможность автоматизации процессов диагностики и расчетов.

Качество решения поставленных задач зависит от глубины знания соответствующей предметной области, поэтому следующий раздел посвящен именно этому вопросу.

**2. Факторы, определяющие здоровье.** По определению Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), здоровье – это состояние полного физического, духовного и социального благополучия, а не только отсутствие болезней и физических дефектов [1]. В связи с этим, оценивая здоровье человека, необходимо учитывать множество определяющих его факторов. На рисунке 2 приведена схема влияний этих факторов и соответственно аспектов, со стороны которых возможно изучение здоровья [2].

Что касается воздействия природно-климатических факторов, то здесь следует учитывать, что в ходе индивидуальной жизни организм

человека приобретает отсутствовавшую ранее устойчивость к определенному фактору внешней среды и таким образом получает возможность жить в условиях, ранее несовместимых с жизнью [3]. Таким образом, в данной работе не будем учитывать подобные факторы ввиду их относительной статичности, считая, что индивид адаптирован к среде своего обитания, и она не оказывает влияния на его состояние в короткий период необходимости отслеживания динамики его здоровья.

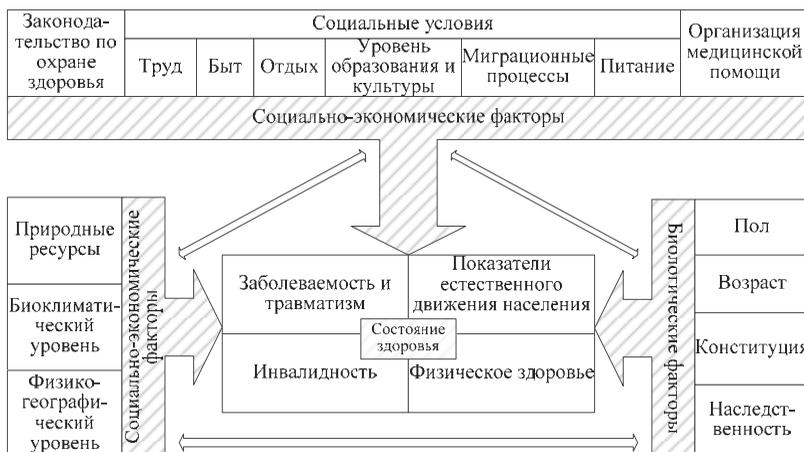


Рис. 2. Схема определяющих здоровье факторов

Социально-экономические факторы также имеют долговременный характер воздействия, поэтому можно говорить о социальной адаптации человека [4], когда оценивать изменение состояния здоровья следует в предположении неизменности бытовых и социальных условий жизни индивида.

Для решения поставленных задач, связанных с оцениванием индивидуального здоровья, наиболее значимыми оказываются биологические факторы и функциональные показатели организма.

Организм человека – это уникальная саморегулирующаяся система, функционирование которой обеспечивается двенадцатью системами органов. Каждая система выполняет свою функцию, от качества исполнения которой зависит здоровье в целом. Однако, человеку свойственны компенсаторные приспособления: если какая-нибудь из систем ослаблена, то другие системы способны частично

взять на себя функцию разрушенных структур путем заместительной гиперфункции или качественно измененной функции.

Таким образом, оценка состояния здоровья должна производиться по совокупности функциональных показателей различных систем организма человека. Разумеется, неоднократно делались попытки выявления зависимостей между различными функциональными параметрами, а также попытки формирования на их основе интегральных оценок состояния здоровья человека, так как интегральные оценки унифицируют и ускоряют процесс первичной диагностики организма.

Такой биомедицинский подход наиболее близок к существующему на данный момент естественнонаучному образу медицинского мышления, когда психосоциальные аспекты болезни остаются в стороне.

Но исключать влияние данных факторов нельзя, поскольку они определяют уровень удовлетворенности человека собой и своей жизнью, самоощущения, что может влиять на восприятие синдромов болезни. Часты случаи, когда пациент соглашается, что состояние его здоровья значительно снижено и ограничивает его возможности, но при этом не соглашается с утверждением о неудовлетворенности собственным здоровьем. И наоборот, пациент может ощущать себя больным при том, что все показатели здоровья оказываются в пределах физиологической нормы [5, 6].

Отсюда вытекает логическое продолжение сформулированного ВОЗ биосоциального определения здоровья – это понятие качества жизни. Для того чтобы сузить это понятие до аспектов функционирования, связанного с заболеванием и/или с лечением, введено понятие качества жизни, связанного со здоровьем – это концепция, включающая широкий спектр физических и психологических характеристик и ограничений, которые описывают возможность индивида функционировать и получать от этого удовлетворение [7, 8, 9].

В связи с этим при выведении интегральной оценки состояния человека следует учитывать субъективную оценку состояния здоровья человеком, определяющую качество жизни человека, связанного со здоровьем [10].

Специфика данной работы предполагает использование интегральной оценки еще и в качестве контейнера для передачи сведений о состоянии здоровья человека в системе удаленного мониторинга пациента.

Задача по созданию модели оценки состояния здоровья является актуальной, что подтверждается результатами анализа существующих решений данной задачи.

**3. Существующие методы интегральной оценки состояния человека.** Большинство методов оценки можно разделить на два класса: методы субъективной оценки (путем самооценки пациентом) и методы объективной оценки (даваемой другим человеком, чаще всего лечащим врачом) [11]. На основе субъективного подхода реализован не один метод, прибегающий к методу опроса (анкетирования, интервьюирования) пациента.

Один из первых таких методов интегральной оценки состояния человека – индекс Карновского (Karnofsky scale score, 1949г.), определяемый по результатам опроса пациента специалистом. Вычисление индекса регламентирует решение социальных вопросов, экспертизу трудоспособности, определение группы инвалидности, прогнозирование течения болезни и продолжительности жизни. Итоговая оценка делается по шкале, представленной таблицей 1 [12].

Таблица 1. Шкала определения индекса Карновского

Состояние	%	Комментарий
А. Способен вести нормальный образ жизни, в т.ч. работать. Нет нужды в дополнительном уходе.	100	Состояние нормальное жалоб нет
	90	Способен к нормальной деятельности, незначительные симптомы или признаки заболевания
	80	Нормальная активность при усилии. Проявление признаков заболевания
Б. Нетрудоспособен. Допустимо нахождение дома с дополнительным уходом. Различный уровень дополнительного ухода.	70	Обслуживает себя самостоятельно, неспособен к нормальной деятельности или активной работе
	60	Нуждается порой в помощи, но способен сам удовлетворять большую часть своих потребностей
	50	Нуждается в значительной помощи и медицинском обслуживании
В. Неспособен обслуживать себя самостоятельно. Нахождение в стационаре.	40	Инвалид, нуждается в специальной помощи, в т.ч. медицинской
	30	Тяжелая инвалидность, показана госпитализация, хотя случай не летальный
	20	Тяжелый больной. Необходимы активное реанимационное лечение и госпитализация
	10	Умиравший
	0	Смерть

На подобии индекса Карновского разработана шкала ECOG-ВОЗ (Eastern Cooperative Oncology Group), оценивающая на основе опроса пациента свободу его деятельности после лечения по пятибалльной шкале. Обе представленные шкалы активно используются в настоящее время для оценки качества жизни онкологических больных.

Среди имеющих распространение за рубежом такие системы опросников, как EQ-5D, SIP (The Sickness Impact Profile) – оценка воздействия болезни на пациента, The Rosser Index, QWB (Quality of Well-Being Scale) – шкала качества жизни, Nottingham Health Profile – Ноттингемский опросник здоровья.

Однако высокая субъективность оценки состояния больного по анкетам приводит к низкой достоверности получаемых результатов. Что подчеркивает существующую проблему объективности информации при использовании опросных методологий получения количественных оценок.

Более объективными являются методы, основанные на анализе некоторых физиологических показателей. Например, один из зарекомендовавших себя методов – экспресс-оценка уровня здоровья по Апанасенко [13]. Состоит из ряда простейших показателей, которые ранжированы, каждому рангу присвоен соответствующий балл. Общая оценка здоровья определяется суммой баллов и позволяет распределить всех практически здоровых лиц на 5 уровней здоровья, соответствующих определенному уровню аэробного энергетического потенциала.

Но метод имеет ряд ограничений: необходимость обладания специальным диагностическим оборудованием (спирометр, динамометр), а также неприменимость метода к людям с ограниченными физическими возможностями.

Помимо описываемых в медицинской литературе методов, принятых в практике, имеется ряд современных разработок, ведущихся в рамках диссертационных работ и проходящих апробацию. Но для всех принятых во внимание методов ограничения по их применению оказываются идентичными:

- сложность доказательства уровня объективности анкетных методов оценки;

- ограничение на сферы применения оценки (учет при оценке дисфункции конкретных систем и органов человека, ориентация на пациентов отдельных категорий);

– необходимость использования дополнительного дорогостоящего диагностического оборудования;

– включение в диагностические тесты заданий, выполнение которых невозможно лицами с ограниченными возможностями.

На основе описанных ограничений сформулированы основные требования к разрабатываемой модели оценки состояния здоровья: возможность самостоятельной диагностики пациентом при сохранении объективности получаемого результата, что обеспечивается сочетанием субъективного подхода, оценивающего психоэмоциональные аспекты восприятия человеком качества своего здоровья, а также объективного подхода, фиксирующего значения физиологических показателей организма с помощью общедоступных диагностических приборов (тонометр, термометр и др.).

При построении модели учет большого количества физиологических показателей, определяющих здоровье, математически затруднителен и необоснован. Однако модель должна максимально точно отражать действительность, поэтому необходимо определить факторы, оказывающие наибольшее влияние на общее состояние человека.

**4. Отбор факторов.** Представляется возможным, выделив наиболее важные факторы, пренебречь менее существенными. Для оценки значимости факторов был применен метод экспертной оценки [13]. В качестве экспертов были привлечены высококвалифицированные практикующие врачи ОГБУЗ «Областной перинатальный центр», которые в связи со своими должностными обязанностями знают физиологию человеческого организма и возможные причины нарушений его функционирования.

Для того чтобы можно было сказать, случайно ли распределение значимости показателей или имеется согласованность во мнениях экспертов, производится вычисление коэффициента конкордации  $k$  по формуле:

$$k = \frac{12S}{n^2(m^3 - m) - n \sum_j T_j^2},$$

где  $n$  – количество экспертов;

$m$  – количество показателей,

$$S = \sum_{i=1}^m (\sum_{j=1}^n x_{ij} - \bar{S})^2, \bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij},$$

$x_{ij}$  – оценка, данная  $j$ -тым экспертом по  $i$ -ому показателю;

$T_j$  характеризует наличие в анкете  $j$ -го эксперта одинаковых оценок и рассчитывается по формуле:

$$T_j = \sum_{r=1}^{m_j} (t_{rj}^3 - t_{rj}),$$

где  $m_j$  – число групп одинаковых оценок в анкете  $j$ -ого эксперта;  
 $t_{rj}$  – число оценок в  $r$ -той группе одинаковых оценок в анкете  $j$ -ого эксперта.

Таким образом, для данного случая коэффициент согласованности мнений экспертов равен:

$$\kappa = \frac{12 \cdot 2049,6}{36 \cdot 990 - 6 \cdot (4 \cdot 150 + 234 + 222)} = \frac{24595,2}{29304} = 0,839.$$

Ориентироваться на высокое значение коэффициента конкордации можно лишь в том случае, если оно является достоверным. Для оценки достоверности использована статистика, приведенная:

$$\chi_{\text{расч}}^2 = \frac{12S}{n \cdot m \cdot (m + 1) - \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^n T_j^2}.$$

Табличное значение  $\chi^2$  - распределения случайных величин – для степеней свободы  $\nu = m - 1 = 9$  и для уровня достоверности  $\alpha = 0,01$  равно 21,7 [14].  $\chi_{\text{расч}}^2 = 45,3$ .

Так как  $\chi_{\text{расч}}^2 > \chi_{\text{табл}}^2$ , то коэффициент конкордации значим и мнения экспертов согласованы. Значит, при выборе показателей можно опираться на мнения экспертов.

По такой оценке в модели необходимо учесть влияние следующих факторов:

- состояние сердечно-сосудистой системы;
- состояние дыхательной системы;
- качество зрения;
- двигательная активности человека;
- состояние эндокринной системы (в частности наличие диабета).

## 5. Используемые методы оценки факторов

**5.1. Оценка состояния сердечно-сосудистой системы.** Из всего множества клинических и физиологических методов исследования сердечно-сосудистой системы (ССС) у человека были выделены методы, соответствующие налагаемым ограничениям, установленным при постановке цели и задач работы. Таким образом, состояние ССС оценивается по следующим параметрам:

- систолическое и диастолическое кровяное давление;
- пульс;
- температура тела.

При отборе показателей учитывалось мнение специалистов, опирающихся на опыт в медицинской практике [15].

Учет данных показателей возможен за счет ввода в систему значений, снятых с помощью цифрового тонометра и термометра. Электронный тонометр позволяет фиксировать сразу и давление, и пульс, кроме того исчезает необходимость использования фонендоскопа – становится возможным самостоятельное измерение данных показателей. Для учета показателей в модели производится перевод введенных значений в соответствии со шкалами.

**5.2. Оценка состояния дыхательной системы.** Для оценки параметров газообмена наблюдаемого человека принят метод пульсоксиметрии, устанавливающий уровень насыщения артериальной крови кислородом (сатурацию).

Сатурация рассчитывается, как соотношение количества связанного гемоглобина ( $\text{HbO}_2$ ) к общему количеству гемоглобина, выраженное в процентах:  $\text{SpO}_2 = (\text{HbO}_2 / (\text{HbO}_2 + \text{Hb}) \times 100\%$  [16].

Нормальный уровень насыщения крови кислородом  $\text{SpO}_2 = 95..98\%$ . Снижение сатурации до уровня 88% и ниже свидетельствует о выраженной дыхательной недостаточности.

Для оценки данного показателя необходимо использование пульсоксиметра.

**5.3. Оценка состояния опорно-двигательного аппарата.** Поскольку необходимо обеспечить возможность оценки человеком своего состояния без обращения к посторонней помощи, для оценки функционирования опорно-двигательного аппарата принят опросник Binkley [17], с учетом накопленного опыта ВОЗ.

Анкета состоит из 20 вопросов. Первые десять вопросов позволяют сделать вывод относительно жизнедеятельности в домашних условиях, рассмотреть имеющиеся трудности при выполнении той или иной работы. Вторая часть шкалы дает оценку активности больных на улице и возможность проанализировать выраженность степени затруднений. Данная шкала оценки состояния опорно-двигательного аппарата прошла валидацию как за рубежом, так и в России и используется в клинической практике.

**5.4. Оценка зрения.** Во многих случаях проверка зрения подразумевает лишь проверку остроты зрения, хотя это не единственная важная характеристика наших глаз.

Однако комплексное обследование зрительной системы, способное выявить все особенности зрения, невозможно без специализированного оборудования и квалифицированного

специалиста. Но существуют методы интерактивной проверки зрения с помощью тестов, направленных на выявление первичных признаков ухудшения зрения.

На основе существующих тестовых заданий для самостоятельной проверки зрения был разработан тест, содержащий 16 вопросов, связанных с проверкой остроты зрения, цветовосприятия, астигматизма, проявление близорукости/ дальнозоркости. Аналогично оценке слуха [18].

**5.5. Контроль диабета.** Самостоятельный контроль уровня глюкозы в крови возможен с помощью специальных аппаратов – глюкометров. Для учета данного параметра в модели необходимо ввести в систему полученное с помощью глюкометра значение.

Физиологической нормой сахара в капиллярной крови является уровень в 3,3- 5,5 ммоль/л. Уровень в 5,6 – 6,0 является показателем преддиабета.

**5.6. Оценка влияния здоровья на качество жизни.** Поскольку уровень качества жизни (КЖ) по большей части объясняется субъективным восприятием человека своего состояния, то для определения влияния здоровья на КЖ человека основным методом является применение опросников. Но необходимо, чтобы применяемые опросники были валидны. Для этого они должны учитывать как можно больше критериев КЖ.

Основополагающие критерии КЖ, выделенные ВОЗ, охватывает адаптированный на русский язык опросник ADDQoL-19, разработанный профессором Clare Bradley из «Health Psychology Research Ltd», базирующемся в Лондоне [19]. Изначально он разрабатывался для оценки влияния диабета на качество жизни человека и оценивает такие аспекты жизни, как уровень независимости в повседневной жизни, возможность ведения профессиональной жизни, отношения с окружающими и семейные отношения, личную мотивацию и др.

На основании ADDQoL были разработаны опросники для оценки влияния остальных учитываемых факторов на КЖ наблюдаемого человека.

**6. Схема функционирования системы удаленного мониторинга.** Внедрение систем удаленного мониторинга пациента, основанных на передаче по электронным каналам связи показаний различных датчиков и фиксации получаемых показаний в базах данных лечебного учреждения или иных заинтересованных организаций требует дополнительных организационных мероприятий

и финансовых затрат, связанных с обеспечением информационной безопасности обрабатываемых в них персональных данных специальных категорий [8, 20, 21, 22, 23].

В основе предлагаемой системы передача интегральных оценок состояния здоровья человека и качества его жизни. Математические преобразования исходных значений физиологических параметров организма снижают точность сведений, однако по-прежнему позволяют судить о динамике состояния пациента, тем самым снижается степень ущерба при реализации угрозы нарушения конфиденциальности персональных данных.

Система может использоваться как для самостоятельного контроля человеком показателей состояния своего здоровья, так и в схеме удаленного наблюдения пациента врачом и уведомления последнего при критических отклонениях динамики состояния пациента. Общая схема функционирования системы представлена на рисунке 3.

На стороне клиента происходит сбор значений функциональных показателей организма с помощью устройств: термометра, тонометра, пульсоксиметра, глюкометра (при наличии диабета).

Все вводимые пользователем показатели, а также результаты прохождения тестов по различным факторам здоровья заносятся в локальную базу данных для реализации возможности ведения подробной статистики по динамике состояния различных систем человеческого организма.



Рис. 3. Схема функционирования системы

Также в клиентской части системы происходит обработка первичных данных и формирование интегральных оценок состояния здоровья и качества жизни по показателю здоровья на основе построенных математических моделей.

В схеме удаленного мониторинга по каналам связи выполняется передача только интегральных оценок состояния пациента в сочетании с уникальным идентификатором пользователя системы. Если оценка состояния пациента низкая, то вместе с интегральными оценками курирующему специалисту передаются также оценки отдельных факторов здоровья ( $L_i$ ), формирующих интегральную оценку. Данный подход позволит специалисту при реагировании на тревожный случай оперативно выявить конкретные жалобы пациента.

Передача по каналам связи интегральных оценок позволяет минимизировать угрозы информационной безопасности, связанные с передачей данных по сетевым каналам [8].

Получаемые специалистами данные от пациентов хранятся в локальной базе данных. С целью снижения требований к уровню защищенности данных получаемые сведения о состоянии здоровья человека (вторичные данные) и сведения о субъекте персональных данных, позволяющие его идентифицировать (первичные данные), предлагается хранить в разных информационных системах. Связь данных производится путем присвоения единого идентификатора первичным и вторичным данным одного субъекта. Таким образом производится обезличивание данных, первоначально отнесенных к специальной категории персональных данных.

**7. Математическая модель расчета интегрального показателя здоровья.** Предварительный анализ предметной области позволил с опорой на общепринятую медицинскую практику и на экспертные мнения выделить факторы, участвующие в формировании интегральной оценки состояния здоровья человека. Также с учетом ограничений по автоматизации определены методы оценки каждого отдельного фактора и оформлена мысль по значимости субъективной оценки влияния факторов на общее состояние для отдельного субъекта. Таким образом, построена содержательная модель, которую необходимо формализовать, выявив связи и отношения между учитываемыми факторами, то есть построить математическую модель.

Искусство моделирования заключается в том, чтобы знать, что, где и как можно упростить [23-27]. Это касается и сокращения факторного пространства и исключения линейно-зависимых показателей.

К числу моделей, описывающих характер и структуру взаимосвязей анализируемых показателей, можно отнести регрессионные модели, модели дисперсионного анализа, модели факторного анализа и временных рядов.

Преимущества этих методов заключаются в том, что с их помощью можно количественно оценить степень влияния того или иного фактора.

Наиболее общими и хорошо описанными являются регрессионные модели. Регрессионный анализ применим для получения моделей влияния качественных и количественных факторов на функцию системы (в данном случае это здоровье человека), именно этот метод применен в данной работе.

**7.1. Регрессионный анализ.** Обычно вначале выбирается линейная модель, вид которой представлен формулой (1), коэффициенты при независимых переменных  $x_i$  характеризуют среднее изменение результата с изменением соответствующего фактора на единицу при неизменных значениях других факторов, закрепленных на среднем уровне.

$$y_i = \theta_0 + \theta_1 x_{1i} + \theta_2 x_{2i} + \dots + \theta_m x_{mi} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Для поиска значений коэффициентов  $\theta_1, \dots, \theta_m$  применяется метод наименьших квадратов, для чего решается система из  $m$  нормальных линейных уравнений с  $m$  неизвестными, которая в векторно-матричной форме имеет вид:

$$X^T X \hat{\theta} = X^T y \quad (2)$$

где  $X$  – матрица значений  $m$  объясняющих переменных в  $n$  наблюдениях;

$X^T$  – та же матрица в транспонированном виде;

$y$  и  $\hat{\theta}$  – соответственно, вектор-столбец значений зависимой переменной в  $n$  наблюдениях и вектор-столбец оценок  $m$  неизвестных коэффициентов.

Система нормальных уравнений (2) имеет единственное решение (3).

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (3)$$

Одной из главных проблем эффективного применения множественного регрессионного анализа является мультиколлинеарность, обусловленная линейной зависимостью между показателями. О наличии зависимостей судят по матрице парных коэффициентов корреляции  $R$ , в случае сильной коррелированности показателей в уравнение регрессии включается один из них.

**7.2. Отбор факторов регрессионной модели.** В таблице 2 приведена матрица частных корреляций между факторами, выявленными экспертно. Заметна значительная связь таких показателей, как состояние сердечно-сосудистой системы и уровень сахара в крови. Включение в модель обоих факторов может повлечь за собой неустойчивость и ненадежность оценок коэффициентов регрессии, поэтому необходимо пересмотреть список показателей.

Таблица 2. Матрица частных корреляций

	ССС	Дыхание	Оп.-дв.	Зрение	Сахар	Оценка (y)
ССС	1	0,11	0,16	-0,21	0,55	0,37
Дыхание	0,11	1	0,35	-0,18	0,06	0,36
Оп.-дв.	0,16	0,35	1	0,5	-0,04	0,8
Зрение	-0,21	-0,18	0,5	1	-0,21	0,29
Сахар	0,55	0,06	-0,04	-0,21	1	0,32
Оценка (y)	0,37	0,36	0,8	0,29	0,32	1

Для решения о включении показателей в модель применен метод ступенчатой регрессии, состоящем в последовательном включении показателей, наиболее коррелированных с вектором регрессионных остатков [28].

Начальный набор признаков пуст, вектор остатков  $r_0 = y$ . На  $k$ -том шаге алгоритма сначала находится признак, корреляция которого с  $r_{k-1}$  максимальна, после чего обновляется вектор остатков по формуле (4).

$$r_k = r_{k-1} + \varepsilon \cdot \text{sign}(r_{k-1}^T x_i) x_i, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – малое число.

Процесс продолжается, пока значение суммы квадратов регрессионных остатков  $\sum (y - f(\theta, x))^2$  не будет изменяться за шаг незначительно.

Подобная стратегия позволила исключить показатель, связанный со зрением.

### 7.3. Математическая модель оценки качества жизни.

Исключительно формальный подход к отбору факторов в данной предметной области невозможен. Как уже оговаривалось выше, оценка качества жизни в большей мере является субъективной оценкой, поэтому коэффициенты влияния того или иного фактора на интегральную оценку должны рассчитываться индивидуально для каждого субъекта.

Методы получения интегральной оценки:

– выделение признака с экстремальным значением в качестве обобщенной оценки объекта;

– вычисление среднего арифметического, если все учитываемые показатели имеют одинаковый знак и вес;

– взвешенное суммирование применяется в тех случаях, когда есть возможность найти весовые коэффициенты, учитывающие вклад отдельных показателей.

Взвешенное суммирование дает наиболее точный результат, определяя вклад факторов в общую оценку в соответствии со степенью беспокойства, вызываемого данными факторами у конкретного субъекта.

Таким образом, в данной работе итоговое значение качества жизни определяется в результате взвешивания вычисленных значений по отдельным факторам (формула 7) и приведения результата к интервалу [0; 100].

$$QoL = \sum_{i=1}^5 k_i \cdot L_i, \quad (5)$$

где  $QoL$  – оценка качества жизни по показателю здоровья;

$i$  – учитываемые параметры;

$k$  – коэффициент воздействия параметра;

$L$  – уровень здоровья для каждого параметра.

Множество коэффициентов должно удовлетворять условию нормировки.

**7.4. Преобразование первичных данных.** Особенностью медицинских показателей является разнообразие форм их представления. Для формализации предметной области необходимо привести первичные показатели, представленные вербальным описанием, качественными и интервальными шкалами к точечному количественному виду.

Предполагается, что отсутствие отклонений для определенного исследуемого признака оценивается 100% уровнем здоровья, таким

образом, необходимо определение формул для нахождения уровня здоровья в процентах для каждого отдельного показателя.

Для перевода к шкале [0, 100] используется формула (6):

$$q_2 = \left( q_1 - \frac{Q_{01} - Q_{02}}{Q_2} \right) \frac{[Q]_2}{[Q]_1}, \quad (6)$$

где  $q_1, q_2$  – точечные оценки в шкалах 1 и 2,  $Q_{01}, Q_{02}$  – точки начала отсчета в соответствующих шкалах,  $[Q]_1, [Q]_2$  – длины интервалов.

Таким образом, получены следующие формулы для перевода оценок:

– для двигательной активности:

$$L_{move} = q_{move} \cdot \frac{10}{8}, \quad (7)$$

– для оценки зрения:

$$L_{eye} = q_{eye} \cdot \frac{10}{7}, \quad (8)$$

где  $q_{move}$  и  $q_{eye}$  – количество баллов, полученных в результате тестов по оценке опорно-двигательного аппарата и по оценке зрения.

Состояние сердечно-сосудистой системы оценивается по трем параметрам с установлением весов каждого из параметров. Итоговая оценка определяется соотношением (9).

$$L_{ccc} = k_1 \cdot AD_{\%} + k_2 \cdot Ps_{\%} + k_3 \cdot t_{\%}, \quad (9)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – весовые коэффициенты, определяющие значимость таких показателей, как артериальное давление, пульс и температура тела соответственно.

Указанные коэффициенты определялись экспертно методом парных сравнений, в соответствии с которым весовые коэффициенты равны собственному вектору матрицы парных сравнений. Было применено приближенное вычисление собственного вектора методом среднего геометрического измерения расстояний между оцениваемыми объектами [29]. В результате получен нормализованный вектор приоритетов:  $k_1 = 0,439, k_2 = 0,277, k_3 = 0,284$ . Отсюда итоговая оценка состояния сердечно-сосудистой системы:

$$L_{ccc} = 0,439 \cdot AD_{\%} + 0,277 \cdot Ps_{\%} + 0,284 \cdot t_{\%}.$$

Перевод входных данных производится на основании формул, выведенных в соответствии с общепринятыми в медицинской практике нормами [30], с учетом мнений экспертов (таблицы 3, 4).

Таблица 3. Правила перевода частоты пульса в процентную шкалу

	Частота пульса уд./мин	Оценка, %	$P_{S\%}$
Выраженная брадикардия	32–48	0-59	$\frac{100}{28}(x - 32)$
Умеренная брадикардия	49–59	60-99	
Физиологическая норма	60–84	100	100
Тахикардия	85–95	68-99	$-\frac{100}{34}(x - 118)$
Выраженная тахикардия	96-118	0-67	
Предельные значения	менее 32, более 118	0	0

Таблица 4. Градации артериального давления

Название степени тяжести	Цифры артериального давления, мм.рт.ст.	Оценка, %
Нормальное давление	106-129/80-85	100
Склонность к гипотонии	100–105/ 55–80	54 - 99
Повышенное давление	130-139/85-89	80 - 99
Умеренная гипертония	140-159/90-99	38 - 79
Гипотония	90–99/ 45–54	14 - 53
Гипертония средней тяжести	160-179/100-109	0 - 37
Тяжелая гипертония	Более 180/ более 110	0
Выраженная гипотония	75–89/ 20–44	0 - 14

В соответствии с нормами, указанными в таблице 4 определены правила перевода артериального давления к процентной шкале:

$$AD_{\%} = \left\{ \begin{array}{l} 100 - 3.2k, k = dys - 85, \text{ если } \begin{cases} sys \in [105; 129] \\ dys > 85 \end{cases} \\ 100 - 1.6k, k = sys - 129, \text{ если } \begin{cases} sys > 129 \\ dys \in [80; 85] \end{cases} \\ 100 - (1.6k_{sys} + 3k_{dys}), k_{sys} = sys - 129, k_{dys} = dys - 85, \text{ если } \begin{cases} sys > 129 \\ dys > 85 \end{cases} \\ 100 - 1.3k, k = 80 - dys, \text{ если } \begin{cases} sys \in [105; 129] \\ dys < 80 \end{cases} \\ 100 - 2.7k, k = 105 - sys, \text{ если } \begin{cases} sys < 105 \\ dys \in [80; 85] \end{cases} \\ 100 - (2.7k_{sys} + 1.3k_{dys}), k_{sys} = 105 - sys, k_{dys} = 80 - dys, \text{ если } \begin{cases} sys < 105 \\ dys < 80 \end{cases} \\ 100 - (2.7k_{sys} + 3.2k_{dys}), k_{sys} = 105 - sys, k_{dys} = dys - 85, \text{ если } \begin{cases} sys < 105 \\ dys > 85 \end{cases} \\ 100 - (1.6k_{sys} + 1.3k_{dys}), k_{sys} = sys - 129, k_{dys} = 80 - dys, \text{ если } \begin{cases} sys > 129 \\ dys < 80 \end{cases} \end{array} \right.$$

В таблице 5 приведены правила перевода значений температуры тела, выведенные с учетом общепринятых физиологических норм и ограничений на разрабатываемую систему, связанных с возможностью самостоятельной работы пользователя с системой.

Таблица 5. Правила перевода температуры тела к процентной шкале

	$t, ^\circ\text{C}$	Оценка, %	$t, \%$
Нормальная температура	36 – 36,6	100	100
Повышенная	36,6 – 38	65 - 99	-25x + 1015
Высокая температура	38 – 40	15 - 64	
Чрезмерно высокая	выше 40	0	0
Пониженная	34 - 36	10 - 99	50x – 1700
Низкая	ниже 34	0	0

Значение сатурации не нуждается в дополнительном преобразовании, поскольку измеряется по 100% шкале.

Для отклонений от нормы по показателю сахара в крови, свидетельствующих о наличии диабета, принята следующая шкала, правила перевода, в которую установлены методом интерполяции по точкам, соответствующим граничным значениям норм, представленным таблицей 6.

Таблица 6. Нормы уровня сахара в крови

	ммоль/л	Оценка, %	Правило перевода ( $L_{\text{diabet}}$ )
Норма	3,5 – 5,5	100	-
Преддиабет	5,6 – 6,0	88- 99	$203,858 - 25,061x + 1,06x^2 - 0,015x^3$
Диабет	$6,1 < x < 20$	0 - 87	
Диабетическая кома	>20	0	-

**7.5. Модели для оценки состояния здоровья и качества жизни.** С учетом всех описанных ранее теоретических выкладок в данном разделе приводятся итоговые математические модели для оценки состояния здоровья и качества жизни по показателю здоровья [31].

Исходные данные собирались на базе Регионального сосудистого центра Томской областной клинической больницы. Репрезентативность выборки в данном случае обеспечивается заменой случайного отбора простым отбором, выполняемого с помощью регулярной, но несущественной для изучаемого вопроса процедуры.

Поскольку исследование связано с медицинской практикой, такой отбор может проводиться по конкретному дню опроса пациентов.

С помощью программного пакета для статистического анализа STATISTICA 7 была проведена оценка распределения выборки людей, на основании которого строилась модель. Результат сравнения распределения наблюдаемых значений по относительным частотам с теоретическим нормальным распределением представлен на рисунке 4.

Полученное значение критерия Колмогорова-Смирнова ( $D$ ) равно 0,106. Критическое значение критерия согласия Колмогорова для выборки объемом 30 при уровне значимости  $\alpha=0,05$  ( $D_{кр}$ ) равно 0,240. Поскольку  $D < D_{кр}$ , гипотеза о нормальном распределении зависимой переменной не опровергается. Таким образом, выполняется условие, необходимое для применения метода наименьших квадратов для оценки коэффициентов регрессии, а также для применения ряда тестов по проверке надежности регрессионной модели.

Линейная модель оценки состояния здоровья включает четыре фактора и описывается соотношением (10).

$$H_{int} = 0.2016 \cdot L_{ccc} + 0.3466 \cdot L_{move} + 1.6226 \cdot L_{air} + 0.4816 \cdot L_{diabet} - 180.74. \quad (10)$$

Variable: Оценка здоровья, Distribution: Normal  
Kolmogorov-Smirnov d = 0,10570,  
Chi-Square test = 2,29259, df = 1 (adjusted), p = 0,12999

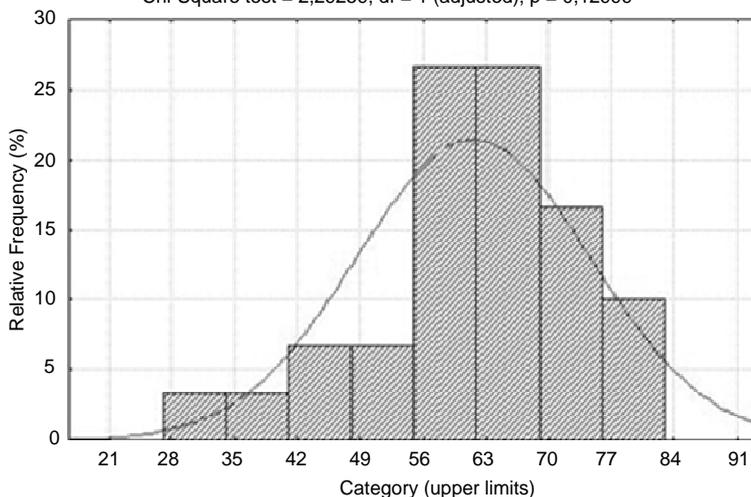


Рис. 4. Сравнение распределения наблюдаемых значений с теоретическим распределением

Модель качества жизни по показателю здоровья определяется формулой (5) В данном случае учитываются все определенные экспертно факторы. Весовые коэффициенты рассчитываются с применением пропорционального деления единицы между факторами на основании полученных по опросникам результатов. Подсчет балла для отдельного фактора выполняется по формуле (11):

$$W_{QoL(i)} = \frac{\sum_n (Imp \cdot W)}{n}, \quad (11)$$

где  $W_{QoL}$  – коэффициент влияния на качество жизни фактора;  
 $Imp$  – влияние на отдельный аспект жизни,  $Imp = \{-3, -2, -1, 0, 1\}$ ;  
 $W$  – коэффициент значимости аспекта жизни,  $W = \{0, 1, 2, 3\}$ ;  
 $n$  – количество значимых для субъекта аспектов жизни.

Таким образом, для каждого фактора значение его влияния на качество жизни варьируется в диапазоне (-9; +3).

После подсчета значений для каждого из факторов производится определение их весовых коэффициентов по правилу (12):

$$k_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^5 W_{QoL(i)}} \cdot W_{QoL(i)}. \quad (12)$$

Для устранения возникающей исключительной ситуации в случае равенства всех значений  $W_{QoL}$  нулю (что равнозначно отсутствию влияния фактора здоровья на качество жизни человека), считаем, что все факторы вносят равный вклад в общую оценку и соответствующие коэффициенты  $k_i$  равны 0,2.

## 8. Верификация моделей.

**8.1. Проверка значимости регрессионной модели оценки состояния здоровья.** Статистическое оценивание надежности коэффициентов регрессии  $\theta_i$  производится с помощью  $t$  – критерия Стьюдента [23].

Вычисляется статистика, описываемая формулой (13):

$$t_n(i) = \frac{\theta_i}{\bar{s}_i}, \quad (13)$$

где  $\bar{s}_i = \sqrt{\frac{(y-x\theta)^T(y-x\theta)c_{ii}}{m-n-1}}$  – средняя ошибка для  $\theta_i$ ;

$X\theta$  – расчетные значения объясняемой переменной;  
 $c_{ii}$ –диагональные элементы матрицы  $(X^T X)^{-1}$ .

Наблюдаемое значение  $t_n(i)$  сравнивается с табличным  $t_\alpha$  при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы  $\nu = m - n - 1$ , где  $m$  – количество наблюдений,  $n$  – число факторов. Значимость  $\theta_i$  подтверждается, если  $|t_n(i)| > t_\alpha$ .

Уровень значимости  $t$ -критерия равен вероятности ошибочно отвергнуть гипотезу о равенстве выборочных средних двух выборок, когда в действительности эта гипотеза имеет место.

При уровне значимости  $\alpha = 0,01$  и степени свободы равной 25.  $t = 2,787$ . Таким образом, при  $\alpha = 0,01$  статистически подтвердились коэффициенты перед  $L_{diabet}$  (0,4816) и  $L_{move}$  (0,3466). При уровне значимости  $\alpha = 0,1$  подтверждаются все коэффициенты, имея следующие наблюдаемые значения  $t$ -критерия:  $t_{nccc} = 1.588$ ,  $t_{nair} = 2,611$ ,  $t_{nmove} = 8.995$ ,  $t_{ndiabet} = 3.88$ .

Для оценки соответствия модели данным вычисляется коэффициент детерминации. В случае линейной модели коэффициент детерминации  $R^2$  характеризует долю дисперсии, объясняемую регрессией, в общей дисперсии результирующего признака и определяется формулой (14).

$$R^2 = \frac{(X\theta - \bar{y})^2}{(y - \bar{y})^2}, \quad (14)$$

где  $\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i$ .

Рассчитанный по формуле (14) коэффициент детерминации равен 0,955, что свидетельствует о высоком уровне соответствия модели исходным данным.

Также необходима проверка гипотезы об информационной способности всей модели в целом с использованием  $F$ -статистики Фишера.

Вычисляется критериальная статистика по формуле (15):

$$F_n = \frac{n - (m + 1)}{n + 1} \cdot (X \cdot \theta)^T \cdot (X \cdot \theta) \cdot [(y - X \cdot \theta)^T \cdot (y - X \cdot \theta)]^{-1}. \quad (15)$$

Критическое значение статистики сравнивается с теоретическим значением  $F$ -статистики Фишера при заданном уровне значимости  $\alpha$  и при числе степеней свободы  $\nu_1 = n + 1$ ,  $\nu_2 = n - (m + 1)$ . При  $\alpha = 0,05$   $F_T = 1,93$ .

Найденное по формуле (15) значение  $F_H = 55,819$ . Если  $F_H > F_T(\nu_1, \nu_2)$ , то надежность регрессионной модели подтверждается. Значит, применение регрессионной модели статистически обосновано.

Относительная ошибка модели рассчитана с применением неравенства Чебышева следующего вида:  $P\left\{|y - X\theta| < \frac{1}{\varepsilon} \cdot \sqrt{\sigma^2}\right\} \geq 0.9$ .

Из данного неравенства следует, что с вероятностью 0,9 отклонение модельных данных от реальных  $|y - X\theta|$  не превышает 14,869.

Относительный коэффициент вариации определяется:

$$E = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\bar{y}} \cdot 100\%,$$

где  $\sqrt{\sigma^2}$  - оценка среднеквадратичного отклонения. В данных расчетах  $E = 7,39\%$ .

**8.2. Верификация модели качества жизни.** Проверка модели качества жизни проводилась на контрольной группе объемом в 10 человек. Состав контрольной группы представлен шестью пациентами Регионального сосудистого центра Томской областной клинической больницы (ТОКБ) разных возрастных и половых групп, имеющих одного лечащего врача, а также четырьмя сотрудниками данного подразделения ТОКБ.

С каждого участника были собраны все учитываемые в модели физиологические параметры, а также результаты заполнения опросников по оценке зрения и двигательной активности.

В указанной таблице также зафиксированы результаты заполнения анкет по оценке влияния того или иного фактора здоровья на качество жизни субъекта и рассчитанные в соответствии с формулой (14) весовые коэффициенты влияния факторов ( $k_i$ ).

По зафиксированным данным с использованием разработанной модели оценки качества жизни по показателю здоровья (формула (15)) рассчитаны итоговые оценки *QoL*.

Отбор контрольной группы производился с учетом возможности экспертной оценки их состояния. Именно поэтому включены пациенты одного лечащего врача (эксперта). Этим же экспертом проводилась оценка состояния оставшихся четырех участников группы.

Для проверки согласованности модельных оценок с оценками, данными экспертом, рассчитан линейный коэффициент их корреляции.

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum(Y - \bar{Y})^2}}$$

где  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  – средние значения соответствующих переменных.

Полученные оценки  $r_{xy} = 0,957$ , что говорит о тесной корреляционной связи между модельными и экспертными оценками.

**9. Заключение.** По результатам проведенного исследования, описанного в данной статье, можно сделать следующие выводы:

– предложена схема функционирования системы удаленного мониторинга пациента на основе передачи интегральных оценок его состояния с учетом вопросов обеспечения информационной безопасности обрабатываемых в системе персональных данных;

– определен набор факторов здоровья, на основании которых возможна интегральная оценка состояния человека: состояние сердечно-сосудистой системы, состояние дыхательной системы, двигательная активность, качество зрения, наличие диабета;

– на базе Регионального сосудистого центра Томской областной клинической больницы сформирована референтная группа лиц, и произведен сбор исходных данных;

– на основе полученных данных после отбора значимых факторов построена регрессионная модель интегральной оценки состояния здоровья человека:  $H_{int} = 0.2016 \cdot L_{ccc} + 0.3466 \cdot L_{move} + 1.6226 \cdot L_{air} + 0.4816 \cdot L_{diabet} - 180.74$ ; а также модель оценки качества жизни человека по показателю здоровья, получаемой в результате взвешенного суммирования отдельных факторов здоровья:  $QoL = \sum_{i=1}^5 k_i \cdot L_i$ ;

– выполнено статистическое обоснование надежности регрессионной модели: коэффициент детерминации  $R^2 = 0.955$ , что говорит о соответствии модели исходным данным, по t-критерию Стьюдента на уровне значимости 0,1 подтверждены все коэффициенты регрессии, общая информационная способность модели подтверждена по критерию Фишера;

– проведена верификация модели оценки качества жизни на основе согласованности модельных расчетов с экспертным мнением: коэффициент корреляции между модельными и экспертными оценками равен 0,957.

Как следствие достигнута поставленная цель. Полученные результаты используются и могут быть использованы для реализации системы удаленного мониторинга пациентов [31-34].

**Благодарности.** Авторы благодарят врачей ОГБУЗ «Областной перинатальный центр» за сотрудничество.

### Литература

1. Устав (Конституция) Всемирной организации здравоохранения от 26 июля 1946г.
2. Социальная гигиена и организация здравоохранения / Под ред. А.Ф.Серенко, В.В. Ермакова. // М.: Медицина, 1984, 2-е изд. 640 с.
3. *Меерсон Ф.З.* Адаптация, стресс и профилактика // М., Наука. 1981. 336 с.
4. *Шурыгина Ю.Ю.* Научно-практические основы здоровья //Улан-Удэ.: ВСГТУ, 2009. 287 с.
5. *Зайцев А.А., Левицкий Е.Ф., Ходашинский И.А., Барабаи Л.В., Плотников О.О.* Метод прогнозирования эффективности восстановительного лечения на основе дерева решений // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2010. № 5. С. 35-38.
6. *Зайцев А.А., Ходашинский И.А., Плотников О.О.* Прогнозирование эффективности немедикаментозного лечения на основе ансамблей классификаторов // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2011. № 4. С. 46-49.
7. *Шишкова Ю.А., Суркова Е.В., Мотовилин О.Г., Майоров А.Ю.* Качество жизни при сахарном диабете: определение понятия, современные подходы к оценке, инструменты для исследования // Сахарный диабет. 2011. №3. С. 70-75.
8. *Мещеряков Р.В., Конев А.А.* К вопросу об исследовании биологических параметров человека в защищенных системах // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2010. № 1-1. С. 131-136.
9. *Мусина В.Ф.* Байесовские сети доверия как вероятностная графическая модель для оценки медицинских рисков // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 24. С. 135–151.
10. *Чернакова С.Э., Карпов А.А., Нечаев А.И., Ронжин А.Л.* Мультимодальный человек-машинный интерфейс в медицинских приложениях // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 11. С. 32-37.
11. *Седнев В.В.* Оценка качества жизни и эффективности лечебно-реабилитационных мероприятий // Международный медицинский журнал. 2004. №1. С. 52-55.
12. *Schag C., Heinrich R., Ganz P.* Karnofsky Performance Status Revisited: Reliability, Validity, and Guidelines // Journal of Clinical Oncology. 1984. vol. 2. no. 3. pp. 187-193.
13. *Ошевский Л.В., Крылова Е.В., Уланова Е.А.* Изучение состояния здоровья человека по функциональным показателям организма // Н-Новгород.: ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2007. 67 с.
14. Таблица хи-квадрат. URL: [http://sernam.ru/book\\_tp.php?id=126](http://sernam.ru/book_tp.php?id=126) (дата обращения 13.09.2013).
15. *Мещеряков Р.В., Щипунов Е.Ф., Васильцева О.Я.* Оценка взаимосвязей между параметрами сердечно-сосудистой системы человека // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 5. С. 14-20.

16. Пульсоксиметрия, сатурация: возможности компьютерной пульсоксиметрии в диагностике обструктивного апноэ сна и дыхательной недостаточности. URL: <http://www.ukrtelemed.com/pulsoksimetriya.php> (дата обращения 7.09.2013г.).
17. *Binkley M.* The Lower Extremity Functional Scale (LEFS): scale development, measurement properties? And clinical application // *Physical Therapy*. 1999. vol. 79. no. 4. pp. 371-383.
18. *Мещераков Р.В., Понизов А.Г.* Оценка качества слуха на основе мобильных вычислительных устройств // *Труды СПИИРАН*. 2011. Вып. 18. С. 93–107.
19. *Bradley C., Todd C., Gorton T., et al.* The development of an individualised questionnaire measure of perceived impact of diabetes on quality of life: the ADDQoL // *Quality of Life Research*. 1999. vol. 8. pp. 79-91.
20. *Ануфриева Н.Ю., Мещераков Р.В., Шевцова Г.А.* Оценка результативности работы центра информационного обслуживания // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2012. Т. 55. № 11. С. 63-66.
21. *Карпов А.А., Ронжин А.Л.* Многомодальные интерфейсы в автоматизированных системах управления // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2005. Т. 48. № 7. С. 9-14.
22. *Ронжин А.Л., Карпов А.А.* Исследование многомодального человеко-машинного взаимодействия на базе информационно-справочного киоска // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2009. Т. 7. № 4. С. 22-26.
23. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. // М.: Финансы и статистика. 1983. 471 с.
24. *Мещераков Р.В.* Критерий структурной сложности информационных систем // *Труды СПИИРАН*. 2010. № 14. С. 76-90.
25. *Ходашинский И.А.* Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы // *Проблемы управления*. 2009. № 4. С. 15-23.
26. *Машевский Г.А., Юлдашев З.М.* Модель принятия решений при диагностике воспалительных процессов организма по виду интоксикации ионами  $HS^-$  и  $Fe^{2+}$  // *Информационно-управляющие системы*. 2013. №2(63). С. 43-47
27. *Ходашинский И.А.* Псевдофизическая логика оценок величин // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 1988. № 5. С. 96.
28. *Стрижев В.В., Крымова Е.А.* Методы выбора регрессионных моделей // М.: Вычислительный центр им. А.А.Дородницына РАН. 2010. 60 с.
29. *Райков А.Н.* Парные сравнения. URL: [http://arhidoka.ru/files/2011/09/Lab\\_3\\_Hierarchy\\_Process.pdf](http://arhidoka.ru/files/2011/09/Lab_3_Hierarchy_Process.pdf) (дата обращения 23.09.2013г.).
30. Справочник медицинской сестры по уходу / Под ред. Н.П.Палева // М.: Медицина. 1981. 336 с.
31. *Мещераков Р.В.* Модель обработки информации в различных шкалах // *Современные информационные технологии*. 2008. № 8. С. 101-103.
32. *Мещераков Р.В., Бондаренко В.П.* Диалог как основа построения речевых систем // *Кибернетика и системный анализ*. 2008. № 2. С. 30-41
33. *Мещераков Р.В., Балацкая Л.Н., Чойнзонов Е.Л.* Специализированная информационная система поддержки деятельности медицинского учреждения // *Информационно-управляющие системы*. 2012. № 5. С. 51-56.
34. *Юсупов Р.М., Ронжин А.Л.* От умных приборов к интеллектуальному пространству // *Вестник Российской академии наук*. 2010. Т. 80. № 1. С. 45-51.

## References

1. Charter (Constitution) of the World Health Organization, 26 July 1946. (In Russ.)
2. *Social'naja gigiena i organizacija zdravoohraneniya* [Social Hygiene and Health Organization]. Edited by A.F. Serenko, V.V. Ermakova. M.: Medical 1984. 2nd ed. 640 p. (In Russ.)
3. Meyerson F.Z. *Adaptacija, stress i profilaktika* [Adaptation, and stress prevention]. Moscow: Nauka. 1981. 336 p. (In Russ.)
4. Shurygina Y.Y. *Nauchno-prakticheskie osnovy zdorov'ja* [Scientific and practical foundation of health]. Ulan-Ude.: ESSTU. 2009. 287 p. (In Russ.)
5. Zaitsev A.A., Levitsky E.F., Khodashinsky I.A., Barabash L.V., Plotnikov O.O. [Method of predicting the effectiveness of rehabilitation treatment on the basis of a decision tree]. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoj fizicheskoj kul'tury – Questions of the resorts, physiotherapy and medical physical culture*. 2010. no. 5. pp. 35-38. (In Russ.)
6. Zaitsev A.A., Khodashinsky I.A., Plotnikov O.O. [Predicting the effectiveness of non-pharmacological treatment based on ensembles of classifiers]. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoj fizicheskoj kul'tury – Questions of the resorts, physiotherapy and medical physical culture*. 2011. no. 4. pp. 46-49. (In Russ.)
7. Shishkova Yu.A., Surkova E.V., Motovilin O.G., Mayorov A.Yu. [Quality of life for patients with diabetes: the definition, modern approaches to assessment, research tools]. *Saharnyj diabet – Diabetes*. 2011. no. 3. pp. 70-75. (In Russ.)
8. Meshcheryakov R.V., Konev A.A. [On the study of biological parameters of the person in secure systems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravlenija i radioelektroniki – Proceedings of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics*. 2010. no. 1-1. pp. 131-136. (In Russ.)
9. Mussina V.F. [Bayesian belief networks as a probabilistic graphical model for the evaluation of health risks]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol 24. pp. 135-151. (In Russ.)
10. Chernakova S.E., Karpov A.A., Nechaev A.I., Ronzhin A.L. [Multimodal human-machine interface in medical applications]. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*. 2008. no. 11. pp. 32-37. (In Russ.)
11. Sednev V.V. [Quality of life and effectiveness of treatment and rehabilitation]. *Mezhdunarodnyj medicinskij zhurnal – International Journal of Medical*. 2004. no. 1. pp. 52-55. (In Russ.)
12. Schag C., Heinrich R., P.Ganz. Karnofsky Performance Status Revisited: Reliability, Validity, and Guidelines. *Journal of Clinical Oncology*. 1984.vol.2, no.3. pp. 187-193.
13. Oshevskiy L.V., Krylova E.V., Ulanova E.A. *Izuchenie sostojanija zdorov'ja cheloveka po funkcional'nym pokazateljam organizma* [The study of human health on functional parameters of the body]. N. Novgorod.: NNGU im. N.I. Lobachevskogo, 2007. 67 p. (In Russ.)
14. Tablica hi-kvadrat [Chi-squared table]. Available at: [http://sernam.ru/book\\_tp.php?id=126](http://sernam.ru/book_tp.php?id=126) (accessed 13.09.2013).
15. Meshcheryakov R.V., Shchipunov E.F., Vasil'tseva O.J. [Assessment of interlinkages between the parameters of the cardiovascular system of man]. *Biomedicinskaja radioelektronika – Biomedical electronics*. 2013. no 5. pp. 14-20. (In Russ.)
16. Pul'soksimetrija, saturacija: vozmozhnosti komp'juternoj pul'soksimetrii v diagnostike obstruktivnogo apnoje sna i dyhatel'noj nedostatochnosti [Oximetry, saturation: pulse oximetry capabilities of the computer in the diagnosis of obstructive sleep apnea and respiratory failure]. Available at: <http://www.ukrtelemed.com/pulsoksimetriya.php> (accessed 7.09.2013). (In Russ.)

17. Binkley M. The Lower Extremity Functional Scale (LEFS): scale development, measurement properties? And clinical application. *Physical Therapy*. 1999. vol. 79, no. 4. pp. 371 – 383.
18. Meshcheryakov R.V., Ponizov A.G. [Assessment of the quality of hearing -based mobile computing devices]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2011. vol. 18. pp. 93-107. (In Russ.)
19. Bradley C., Todd C., Gorton T., et al. The development of an individualised questionnaire measure of perceived impact of diabetes on quality of life: the ADDQoL. *Quality of Life Research*. 1999. vol. 8. pp. 79-91.
20. Anufrieva N.Y., Meshcheryakov R.V., Shevtsova G.A. [Assessing performance documentation center]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie – News of higher educational institutions. Instrument*. 2012. vol. 55. no. 11. pp. 63-66. (In Russ.)
21. Karpov A.A., Ronzhin A.L. [Multimodal interfaces in automated control systems]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie – Proceedings of the higher educational institutions. Instrument*. 2005. vol. 48. no. 7. pp. 9-14. (In Russ.)
22. Ronzhin A.L., Karpov A.A. [Study multimodal human-computer interaction based on information kiosks]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy – Information- measuring and control systems*. 2009. vol. 7. no. 4. pp. 22-26. (In Russ.)
23. Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Osnovy modelirovaniya i pervichnaja obrabotka dannyh. Spravochnoe izd.* [Applied Statistics: Basics of modeling and preprocessing of data. Reference ed]. M.: Finansy i statistic. 1983. 471 p. (In Russ.)
24. Meshcheryakov R.V. [Criterion structural complexity of information systems]. *Trudy SPIIRAN – Proceedings SPIIRAS*. 2010. no. 14. pp. 76-90. (In Russ.)
25. Khodashinsky I.A. [Identification of fuzzy systems: methods and algorithms]. *Problemy upravleniya – Control*. 2009. no. 4. pp. 15-23. (In Russ.)
26. Mashevsky G.A., Yuldashev Z.M. [Decision-making model for the diagnosis of inflammatory processes of the body to an intoxication HS- ions and Fe2 +]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. 2013 no. 2(63). pp 43-47. (In Russ.)
27. Khodashinsky I.A. [Pseudo physical logic estimates of the values]. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Teorija i sistemy upravlenija – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. 1988. no. 5. pp. 96. (In Russ.)
28. Strizhev V.V., Krymova E.A. *Metody vybora regressionnyh modelej* [Methods for selecting regression models]. M.: Vychislitel'nyj centr im. A.A.Dorodnicyna RAN. 2010. 60 p. (In Russ.)
29. Raykov A.N. Parnye sravnenija [Pairwise comparisons]. Available at: [http://arhidoka.ru/files/2011/09/Lab\\_3\\_Hierarchy\\_Process.pdf](http://arhidoka.ru/files/2011/09/Lab_3_Hierarchy_Process.pdf) (accessed 23.09.2013). (In Russ.)
30. *Spravochnik medicinskoj sestry po uhodu* [Directory nurse care]. Edited by N.R.Paleeva. M.: Medicina. 1981. 336 p. (In Russ.)
31. Meshcheryakov R.V. [Model of information processing in different scales]. *Sovremennye informacionnye tehnologii – Modern information technology*. 2008. no. 8. pp. 101-103. (In Russ.)
32. Meshcheryakov R.V., Bondarenko V.P. [Dialogue as a basis for constructing speech systems]. *Kibernetika i sistemyj analiz – Cybernetics and Systems Analysis*. 2008. no. 2. pp. 30-41. (In Russ.)
33. Meshcheryakov R.V., Balatskaya L.N., Choinzonov E.L. [Specialized information system support of the medical facility]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. 2012. no. 5. pp. 51-56. (In Russ.)
34. Yusupov R., Ronzhin A.L. [From smart devices to intelligent space]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk – Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2010. vol. 80. no. 1. pp. 45-51. (In Russ.)

**Козыренко Наталья Сергеевна** — инженер кафедры Комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем ТУСУР. Область научных интересов: информационная безопасность, математическое моделирование. Число научных публикаций — 2. office@keva.tusur.ru; 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, р.т. +7 (3822) 900-111, факс +7 (3822) 900-111.

**Kozyrenko Natalia Sergeevna** — engineer, Dept. of Complex Security of Electronic-computing Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR). Research interests: medical technology, information security. The number of publications — 2, office@keva.tusur.ru; KIBEVS Dept. TUSUR, 40, Lenin-avenue Tomsk, 634050, Russia; office phone +7(3822)413-426, fax +7(3822)900-111.

**Мешеряков Роман Валерьевич** — д-р. техн. наук, профессор кафедры Комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем ТУСУР. Область научных интересов: системный анализ, информационная безопасность, вопросы обработки информации в интеллектуальных системах, особое внимание уделяется вопросам создания информационно-безопасных систем. Число научных публикаций — 247. mrv@security.tomsk.ru; 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 210; р.т. +7 (3822) 900-111, факс +7 (3822) 900-111.

**Meshcheriakov Roman Valerievich** — Ph.D., Dr.Sci., professor, Dept. of Complex Security of Electronic-computing Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR). Research interests: speech analysis, speech recognition, medical technology, information security. The number of publications — 247, IEEE Senior Member. mrv@security.tomsk.ru; KIBEVS Dept. TUSUR, 40, Lenin-avenue Tomsk, 634050, Russia; office phone +7(3822)413-426, fax +7(3822)900-111.

**Ходашинский Илья Александрович** — д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем ТУСУР. Область научных интересов: вычислительный интеллект, метаэвристики. Число научных публикаций — 117. hodashn@rambler.ru; 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; р.т. +7 (3822) 900-111, факс +7 (3822) 900-111.

**Hodashinsky Ilya Aleksandrovich** — Ph.D., Dr.Sci., professor, Dept. of Complex Security of Electronic-computing Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR). Research interests: computational intelligence, metaheuristics. The number of scientific publications — 117. IEEE Member. hodashn@rambler.ru; 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 40, phone: +7 (3822) 900-111, Fax: +7 (3822) 900-111.

**Ануфриева Наталья Юрьевна** — к-т. техн. наук, доцент, начальник информационно-вычислительного отдела КГБУЗ «Консультативно-диагностический центр». Область научных интересов: вопросы обработки информации в медицинских системах, моделирование информационных процессов. Число научных публикаций — 45. office@kdc.bysk.secna.ru; 659306, г. Бийск, ул. Советская, 33; р.т. +7 (3854) 327554, факс +7 (3854) 327554.

**Anufrieva Natalia Yurievna** — Ph.D., assistant professor, Head of the Department Information-Computer System of "Consultation and Diagnostic Center". Research interests: information processing in medical systems, modeling of information processes. The number of publications — 45 Member. office@kdc.bysk.secna.ru; 33, Sovetskaya ul., 659306, Russia; Bysk, office phone/fax +7(3854) 327554.

## РЕФЕРАТ

*Козыренко Н.С.,*                      *Мещеряков Р.В.,*                      *Ходашинский И.А.Г.,*  
*Ануфриева Н.Ю.* **Математическое и алгоритмическое обеспечение**  
**оценки состояния здоровья человека.**

Как правило, основой оценки состояния человека являются субъективные суждения врача, даваемая им на основе анализа информации о состоянии подсистем организма по отточенным многолетним опытом методом диагностики. В этом случае, специалисту необходимо предоставление ряда функциональных показателей и проработка схем их защищенной передачи.

Предлагается решение, позволяющее скрыть конкретные показатели здоровья человека, не снизив при этом информативности об общем состоянии пациента. Целью работы является разработка численного метода и алгоритмов оценки уровня здоровья и качества жизни человека по показателю здоровья для реализации автоматизированной системы удаленного мониторинга пациента с учетом обеспечения информационной безопасности обрабатываемых в системе персональных данных.

Исключительно формальный подход к отбору факторов невозможен. Коэффициенты влияния того или иного фактора на интегральную оценку должны рассчитываться индивидуально для каждого субъекта.

При отборе показателей учитывалось мнение специалистов, опирающихся на опыт в медицинской практике. По такой оценке в модели необходимо учесть влияние следующих факторов: состояние сердечно-сосудистой системы; состояние дыхательной системы; качество зрения; двигательная активности человека; состояние эндокринной системы (в частности наличие диабета).

Исходные данные собирались на базе Регионального сосудистого центра Томской областной клинической больницы. Репрезентативность выборки в данном случае обеспечивается заменой случайного отбора простым отбором, выполняемого с помощью регулярной, но несущественной для изучаемого вопроса процедуры. Поскольку исследование связано с медицинской практикой, такой отбор может проводиться по конкретному дню опроса пациентов.

Учет данных показателей возможен за счет ввода в систему значений, снятых с помощью цифрового тонометра и термометра. Электронный тонометр позволяет фиксировать сразу и давление, и пульс, кроме того, исчезает необходимость использования фонендоскопа – становится возможным самостоятельное измерение данных показателей. Для учета показателей в модели производится перевод введенных значений в соответствии со шкалами.

Методы получения интегральной оценки включает в себя: выделение признака с экстремальным значением в качестве обобщенной оценки объекта; вычисление среднего арифметического, если все учитываемые показатели имеют одинаковый знак и вес; взвешенное суммирование применяется в тех случаях, когда есть возможность найти весовые коэффициенты, учитывающие вклад отдельных показателей.

При этом взвешенное суммирование дает наиболее точный результат, за счет учета вклад факторов в общую оценку в соответствии со степенью беспокойства, вызываемого данными факторами у конкретного субъекта. Проверка адекватности созданной модели показала соответствие оценок здоровья пациентов, полученных на модели и специалистами-медиками.

## SUMMARY

*Kozyrenko N.S., Meshcheryakov R.V., Hodashinsky I.A., Anufrieva N.Y.*

### **Mathematical model and algorithms of people health evaluation.**

Basis of assessment of the human condition is a subjective assessment of a doctor, given by him on the basis of analysis of information on the state of the subsystems of the body using diagnostic procedures developed during years of experience. In this case, the specialist needs in providing of a number of functional indicators and their secure transmission.

A solution that allows you to hide specific indicators of health without decreasing the informative of the patient general state is proposed. The aim of the research is to develop quantitative methods and algorithms for assessing the level of health and quality of life in terms of health for the implementation of automated system for remote monitoring of patients with the information security system, which processes personal data.

Extremely formal approach to the selection of factors is impossible. The coefficients of the influence of various factors on the integrated assessment should be calculated individually for each subject.

During selection of indicators the opinion of experts based on the experience in the practice of medicine was taken into account. Such assessment should use the following factors: the state of the cardiovascular system, the respiratory system, the quality of vision, motor activity of man, the state of the endocrine system (in particular, the presence of diabetes).

Experimental data were collected at the Regional Vascular Center of Tomsk Regional Hospital. Representativeness of the sample in this case is provided by the replacement of a simple random sample selection, which is carried out by means of regular procedures, but irrelevant to the issue under study. Because the study is associated with medical practice, such selection can be performed on a particular day of the patient survey.

The accounting of these parameters is possible by introducing a system of values registered by a digital thermometer and sphygmomanometer. Electronic tonometer allows a physician to fix once pressure, and pulse, in addition it eliminates the need to use stethoscope - it is possible to self-measurement of these indicators. To account of the indicators in the model, the entered values are converted in accordance with the scales.

Methods for preparation of integrated assessment: feature extraction with an extreme value as a generic estimate of the object, calculating the arithmetic mean, if all relevant parameters have the same sign and weight; the weighted sum is used in cases where it is possible to find weights and take into account the contribution of individual indicators.

The weighted summation yields the most accurate results by the factors determining the contribution to the overall assessment in accordance with the degree of disturbance caused by these factors of a subject. Testing the adequacy of the developed model has shown compliance of the health of patients estimates obtained by the model and medical professionals.

М.Л. НИКОНОВА, Ю.А. ПИЧУГИН, А.В. ТИШКОВ  
**МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ МЕДИЦИНСКИХ  
СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ КОМПЬЮТЕРНОМУ  
МОДЕЛИРОВАНИЮ**

---

*Никонова М.Л., Пичугин Ю.А., Тишков А.В. Методика обучения студентов медицинских специальностей компьютерному моделированию.*

**Аннотация.** В статье описана методика обучения студентов – будущих врачей компьютерному моделированию, которое обеспечивает повышение уровня информационно-технологической компетентности студентов и, тем самым, оказывает положительное влияние на процесс обучения в целом. Показан обоснованный выбор метода обучения, выделены виды учебной деятельности студентов, описаны технологические приемы, способствующие освоению знаний.

**Ключевые слова:** Компьютерное моделирование, воксельные модели, медицинская информатика

*Nikonova M.L., Pichugin Y.A., Tishkov A.V. Methodology of teaching medical students of computer modeling.*

**Abstract.** The article deals with methodology of teaching medical students computer modeling, which improves students' information and technological competence and has positive effect on learning process in general. It shows the process of choosing teaching method, identifies types of educational activities of students and describes technological actions that enhance knowledge acquisition.

**Keywords:** computer modeling, voxel man, medical informatics.

---

**1. Введение.** В соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) образовательные учреждения получили дополнительные академические свободы в формировании содержания и организации учебного процесса, акценты смещены с минимума содержания на требования к результату образования. Появились новые понятия, связанные с компетентностным подходом, такие как общекультурные и профессиональные компетенции обучения; позволяют ориентировать учебный процесс на активное и самостоятельное овладение учащимися теоретических и прикладных знаний. Компетентностный подход «выдвигает на первое место не информированность студента, а умение разрешать проблемы, возникающие в ситуациях» [2]. Компетенции формируются и развиваются посредством содержания обучения, образовательной среды и образовательными технологиями. Теоретическое и практическое изучение компьютерных технологий обработки информации; изучение специального программного обеспечения; развитие и освоение умений и навыков практического применения компьютерных

технологий; овладение культурой общения с использованием сети Интернет являются основными способами формирования компетенций. В соответствии с проведенным Р.Р. Фокиным [13] анализом методов современной информатики (теория открытых систем, объектно-ориентированный подход, системная интеграция), при обучении информатике целесообразно преобразовать существующие методы, формы и средства обучения в открытые системы обучения, которые характеризуются расширяемостью, мобильностью, открытым интерфейсом и дружелюбностью. При условии адаптации открытых систем к педагогике возможно развитие методик обучения информатики с построением различных моделей обучения.

В данной статье рассмотрена модель методики обучения студентов медицинских специальностей процессу компьютерного моделирования. Авторы ставили перед собой *задачи*:

- 1) обосновать выбор метода обучения – компьютерное моделирование, выделить виды учебной деятельности студентов.
- 2) описать технологические приемы, способствующие освоению знаний и развитию информационно-технологической компетентности студентов.

**2. Компетентностный подход и освоение образовательных программ.** Модель организации учебного процесса в профессиональном образовании представлена в виде модульной структуры. При этом в качестве *цели обучения* выступает совокупность профессиональных компетенций обучающегося, а в качестве *средства ее достижения* – содержания профессионального обучения [3].

Согласно Мысину М.Н. [6] в состав профессиональной компетенции входит компетентность в области информационных и компьютерных технологий, в которой можно выделить компетентность в области информационно-технологического образования. Под информационно-технологической компетентностью понимается готовность использовать средства информационных технологий для решения профессиональных задач [1]. В таблице 1 представлены требования и общекультурные компетенции к освоению основных образовательных программ [12].

Таблица 1. Требования к освоению образовательных программ подготовки

Общекультурные компетенции дисциплины «Информатика»	Требования ФГОС ВПО к результатам освоения образовательных программ подготовки специалисты по направлению (специальности) «Педиатрия», «Лечебное дело», Медико-профилактическое дело», «Стоматология», «Медицинская биофизика»
готовность использовать основные способы и средства получения, хранения, обработки и вывода информации; в качестве средства управления информацией умело применять компьютер	должен владеть компьютерной техникой
знание и соблюдение основных требований информационной безопасности	уметь получать информацию из различных источников
способность работать с информацией в глобальной сети Интернет	работать с информацией в глобальных компьютерных сетях
владение культурой мышления, возможностью к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей её решения	применять возможности современных информационных технологий для решения профессиональных задач

Ниже мы последовательно рассмотрим принципы отбора содержания обучения, методы и средства обучения, формы организации учебного процесса и оценку результатов.

**3. Содержание обучения и принципы отбора.** Содержание обучения определяется двумя составляющими: теоретической и практической. В нашем случае это будет моделирование как метод научного познания, основа построения компьютерных моделей и технология создания, исследования компьютерных моделей, соответственно.

Ведущими принципами отбора содержания в соответствии с анализом научных работ (Беспалько В.П., Гурьев А.И., Калинин С.И., Подласый И.П.) являются:

- *междисциплинарность*: в процессе отбора содержания обучения учитывались связи с разделами дисциплин «Медицинская информатика» и «Анатомия человека»;

- *научность*: содержание основывается на обучающем и научном программном обеспечении VOXEL–MAN, компьютерном моделировании, расширенных возможностях офисных пакетов, которые также являются направлением современных исследований;

– *практико–ориентированность*: умение использовать современное прикладное программное обеспечение и средства информационных технологий, навыки построения компьютерных моделей для решения профессиональных задач, связанных с четкой визуализацией изучаемых объектов; умение устанавливать логическую связь между анатомическими объектами и функциональными процессами, в которых эти объекты принимают непосредственное участие;

– *систематичность и последовательность изложения*: определена последовательность изучения тем: изучаются основы компьютерного моделирования, технологии работы с обучающим и научным специализированным программным обеспечением, технологии дополнительных возможностей офисных прикладных пакетов.

**4. Компьютерные модели.** В соответствии с определением, которое дает Макарова Н.В. [5], компьютерная модель – это модель, реализованная средствами программной среды. Компьютерные модели, используемые для обучения и прошедшие проверку десятком лет использования в учебном процессе, обладают высокой точностью, адекватностью и наглядностью, что позволяет выявить основные факторы, характеризующие свойства изучаемого объекта-оригинала или же целого класса объектов. Модель, по содержанию, может быть описательной (текст); структурной, представляющей состав, иерархию компонентов системы; функциональной или функционально–динамической (используются схемы и сравнительные таблицы); интегрированной, включающей в себя компоненты нескольких видов моделей. Первые три вида моделей можно отнести к познавательным и объяснительным моделям, а четвертую модель – к преобразовательным. Пупырев Н.П. в своей статье описывает педагогические возможности компьютерных моделей, которые визуализируют человеческие знания, не имеющие текстовых описаний. Модели позволяют вести поиск путей перехода от наблюдаемых образов–картин к формулировке некоторой гипотезы о тех механизмах и процессах, которые скрыты за динамикой наблюдаемых картин [11].

В различных областях медицины широкое распространение получают методы визуализации внутренних структур человека на основе данных компьютерно-томографических исследований. Визуализация используется для представления не зрительной информации, например, температуры, плотности жидкости, и т.д. Процесс визуализации с помощью компьютерных программ – это процесс получения изображения по заданной математической модели (алгоритму), на основании имеющихся сведений о строении и свойствах некоего объекта. Математические методы реконструируют трехмерную структуру органов по

множеству параллельных сечений и получают его воксельное представление. Воксельные модели часто используются для анализа медицинской и научной информации. Компьютерная модель визуализации медицинской информации – это объемная трехмерная реконструкция анатомических объектов математическими методами и получение воксельного представления, позволяющего создать систематическое представление о строении организма человека, точно и наглядно передать анатомическую информацию и облегчить ее понимание. Обучающее и научное программное обеспечение VOXEL–MAN 3D Navigator (Германия) поставляются на электронных дисках DVD и CD, не требуют мощных современных компьютеров и большой внутренней памяти, имеют несложный интерфейс. В состав информационной библиотечной платформы Ovid Technologies Inc. (Ovid) входит анатомический атлас Primal Pictures (Великобритания), содержащий 20 учебных и методических модулей, 11 интерактивных мультимедийных модулей. Все изображения векторной графики основаны на реальных снимках, в модулях размещены клинические фотографии и flash–ролики функциональной анатомии. Анатомический портал имеет понятный интерфейс, удобную навигацию, встроенную поисковую систему, графические, текстовые документы и видеофайлы, содержит около 100000 индивидуальных интерактивных схем. Подключиться к анатомическому portalу можно по выделенному IP-адресу.

**5. Методы и средства обучения.** Компьютерное моделирование является методом решения задачи анализа или синтеза сложной системы на основе использования ее компьютерной модели, как отмечает Н.В. Макарова. Суть компьютерного моделирования заключена в получении количественных и качественных результатов по имеющейся модели. Качественные выводы, получаемые по результатам анализа, позволяют обнаружить неизвестные ранее свойства сложной системы: ее структуру, устойчивость, целостность и др. Количественные выводы используются для прогноза будущих или объяснения прошлых значений переменных исследуемого объекта [5]. Программная среда компьютерного моделирования может быть универсальной (текстовые, табличные, графические редакторы) и специализированной. Обычно различные виды моделирования дополняют друг друга. Так, если математическая формула очень сложна и не дает явного представления об описываемых ею процессах, то на помощь приходят графические и имитационные модели.

Компьютерное моделирование позволяет представить игровую модель профессиональной деятельности и является *активным методом обучения*, ориентированным на развитие информационно-технологической компетентности включающей: навыки построения

компьютерных моделей, использования дополнительных возможностей текстового редактора Microsoft Word, таких как создание и форматирование, сортировка данных в таблицах, вставка объектов в документ, форматирование документа, освоения инструментов и технологических приемов графического редактора Microsoft Visio. *Содержательный компонент методики* ориентирован на формирование умений и навыков конструирования компьютерных моделей визуализации анатомических структур, знаний расширенных возможностей офисных пакетов и готовности к решению анатомических задач программным способом. *Организационный компонент разработанной методики* выражается в освоении этапов компьютерного моделирования с увеличением самостоятельности студентов и создании условий для включения студентов в выполнение индивидуальных заданий.

В соответствии с классификацией Пидкасистого П.И. [10] методы работы преподавателя – метод моделирования при индивидуальном и дифференцированном подходе к обучению; метод работы студентов – самостоятельная работа: по образцу, реконструктивная. Студент воспринимает информацию, знакомится с содержанием рекомендованных источников информации (CD Voxel-man и интернет-портал Primal Pictures), отбирает необходимый материал, выделяет этапы моделирования, формулирует мини-задания, выполняет задания, осуществляет этапы моделирования, демонстрирует и обосновывает полученные результаты. Усиление доли самостоятельной работы студентов позволяет создать условия для формирования умений самостоятельно определения целей, самостоятельного решения поставленных задач и самоконтроля. Преподаватель является в данном случае консультантом [4].

Выбор средств информационных технологий определяется учебными задачами. Средства обучения разделяются на материальные и нематериальные, виртуальные. Среди виртуальных средств обучения можно выделить обучающее, научное специализированное программное обеспечение (VOXEL MAN) и прикладные офисные программы.

Следует отметить, что, в соответствии с новыми образовательными стандартами, вариативная часть основной образовательной программы составляет 40% или 24 зачетные единицы. Для темы «Компьютерное моделирование» достаточно выделить 17 академических часов. Введение модуля компьютерного моделирования позволит индивидуализировать образовательную программу и ее усвоение в зависимости от способностей и интересов, обеспечить интерактивный диалог, активизировать познавательную деятельность, которая способствует лучшему восприятию и запоминанию учебного материала с включением подсознательных реакций обучающихся, слуховой и эмоциональной памяти [8].

**6. Этапы компьютерного моделирования.** *Компьютерное моделирование* проходит в соответствии с этапами, предложенными Макаровой Н.В. [5]. При проведении компьютерного моделирования выделяется 4 этапа. 1 этап – постановка задачи: описание задачи, цель моделирования, формализации задачи. 2 этап – разработка модели: создание информационной модели, компьютерной модели. 3 этап – компьютерный эксперимент: план эксперимента, тестирование модели, проведение эксперимента. 4 этап – анализ результатов моделирования.

Рассмотрим конкретный пример проведение компьютерного моделирования с использованием среды Microsoft Word. В этом случае, будем говорить о моделировании составных документов, в состав которых входят структурные и алгоритмические модели.

*Задача.*

Дыхательная система функционирует как система обеспечения доставки кислорода крови и тканям организма, а также как система отдачи углекислого газа, образовавшегося в результате тканевого обмена. Для осуществления дыхательного акта требуются анатомические структуры обеспечивающие циркуляцию воздуха.

*1 этап. Постановка задачи.*

Задача формулируется в виде словесного описания, в соответствии с которым определяется цель моделирования. Формализация задачи проходит в виде вопросов и ответов, формируется наиболее полное описание объекта моделирования, выделяются его элементы, устанавливаются связи между ними, выявляются наиболее существенные характеристики объекта и параметры, которые могут влиять на объект.

*Разработать модель дыхательного тракта, отображающего изменения в соотношениях органов грудной клетки, происходящие при дыхании и выдохе.*

*Цель:* развитие умений и навыков проведения этапов компьютерного моделирования; повышение уровня знаний и пользовательских навыков студентов в работе с прикладным программным обеспечением.

*Формализация задачи:*

Какие объекты входят в состав документа?

Каков размер страницы?

Каковы поля страницы?

Какова ориентация страницы?

Какие иллюстрации используются при построении?

Какой шрифт используется при построении?

Какой минимальный кегль допустим в документе?

Используется ли библиотека математических символов?

В каком виде будет представлен документ?

Какие анатомические органы участвуют в процессе дыхания (русское и латинское наименование)?

Для чего служат дыхательные органы?

Какие органы обеспечивают циркуляцию воздуха?

Какие ткани участвуют в построении стенок дыхательных путей?

Какие анатомические объекты участвуют в голосообразовании?

*2 этап. Разработка модели.*

*Информационная модель может быть представлена в виде таблицы или логических высказываний. Для построения таблицы требуются определенные данные, например, последовательность расположения. Примеры информационных моделей приведены в таблицах 2 и 3.*

Таблица 2. Информационная модель составного документа

Объект	Параметры	
	название	значение
Таблица	количество строк	2-20
	количество столбцов	2-10
	выравнивание текста в ячейках	по левому краю, по ширине
Рисунок	способ вставки	из файла
	обтекание текстом	по контуру
Подписи	выравнивание	по левому краю, посередине
	добавление названия	автоматические
Фигуры готовые	блок-схемы	данные, процесс, решение, документ, карточка, задержка
SmartArt	линии	линия, стрелка, кривая, соединительная
	основные фигуры	прямоугольник, скругленный прямоугольник, овал, ромб, параллелограмм
	фигурные стрелки	вправо, влево, углом, выгнутая, двойная
	список	простой, пирамидальный, вертикальный
	иерархия	табличная, с круглым рисунком, организационная
	процесс	простой, непрерывный блочный, со смещением
Надпись	надпись	простая
	выравнивание текста	посередине, по левому краю
Диаграмма	гистограмма	объемная, цилиндрическая
	график	график, с маркерами

Построим информационные модели для анатомических образований. Носовая полость, структура, состав. Скелетотопия глотки. Скелетотопия и синтопия гортани. Мышцы гортани. Отделы гортани. Ске-

летотопия трахеи, синтопия, строение. Бронхи, строение и их разветвление. Бронхиальное дерево. Сегментарное строение легких. Легкие: формы, строение. Плевра и плевральная полость. Средостение, границы.

С помощью логических высказываний можно составить словесное описание или словесный алгоритм анатомических объектов и структур, которые помогут понять их функциональное значение.

Таблица 3. Информационная модель объектов дыхательной системы

Объект	Параметры	
	название	значение
Бронх	структура	главные, долевыe, сегментарные, субсегментарные, междольковые, внутридольковые, терминальные, дыхательные бронхиолы
	количество	2
	главные	правый и левый
	количество долевыx бронхов	5
	долевыe слева	верхний и нижний
	долевыe справа	верхний, средний и нижний
	сегментарные бронхи, количество	20
	субсегментарные бронхи, количество	9-10

*Графическая модель.* Построение структурных и структурно-функциональных схем анатомических органов. Графические иллюстрации. Графические модели могут быть построены с помощью технологических приемов, предусмотренных конкретной средой, например, на рисунке 1 и рисунке 2.

*Компьютерная модель.* Построение вариантов компьютерных моделей: вдыхания и выдыхания (таблица 4). При построении компьютерных моделей используют технологические приемы, предусмотренные средой Microsoft Word.

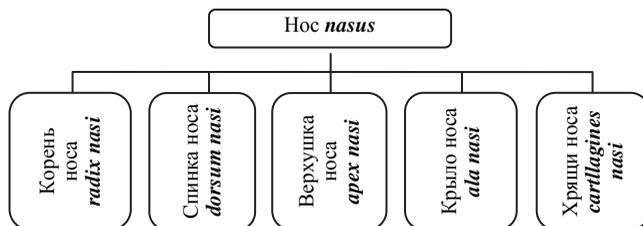


Рис. 1. Структурная схема носа

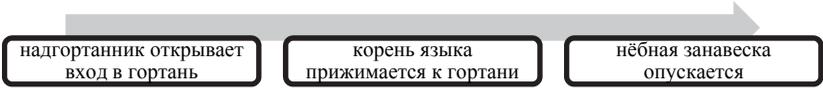


Рис. 2. Акт глотания

Таблица 4. Компьютерные модели вдыхания и выдыхания

<p><b>ВДОХ</b></p>	<p><b>ВЫДОХ</b></p>
<p>Если диафрагма сокращается и движется вниз, межреберные мышцы поднимают реберный корсет вверх и вперед, тогда объем грудной полости увеличивается, легкие расширяются, и воздух входит в легкие.</p>	<p>При расслаблении мышц диафрагма принимает исходное положение за счет упругости, перепада давления и давления органов, находящихся в брюшной полости, грудная клетка движется вниз и уменьшается в объеме, воздух выходит из легких.</p>

В приведенном примере рассматриваются области знаний: параметры документа, конвертирование документа, создание таблицы, ввод данных, форматирование текста, графические элементы документа.

*3 этап. Компьютерный эксперимент.*

Определяется, понятны ли построенные модели?

Какие технологические приемы, используемые при построении, способствуют лучшему пониманию?

*Рассматривается общий план строения дыхательной системы. В соответствии с целью моделирования просматриваются все варианты компьютерных моделей, выделяются отличия.*

*4 этап. Анализ результатов.*

Практическая проверка получаемых с помощью компьютерных моделей знаний и их использование. *Анализируются отличия в компьютерных моделях по выделенным патологиям и сопутствующим заболеваниям. Выделяются модели знаний, которые необходимо запомнить.*

*Например.* Дыхание через нос: носовая полость, хоаны, носоглотка, ротовая часть глотки, гортань. Дыхание через рот: отсутствуют приспособления для контроля и обработки воздуха, поэтому возможны частные заболевания.

**7. Формы обучения.** Форма обучения позволяет реализовать учебную деятельность студентов по усвоению содержания учебного материала и освоению способов деятельности [10]. Важнейшей особенностью любой формы обучения является возможность студентов учиться работать: слушать, обсуждать вопросы при коллективной работе, сосредотачиваться и организовывать свою работу, высказывать свои суждения, выслушивать других, опровергать их доводы или соглашаться с ними, аргументировать свои доказательства, дополнять чужие, составлять конспекты, компоновать тексты докладов, работать с источниками знания, организовывать свое рабочее место, планировать свои действия, укладываться в отведенное время и т.п. [10]. Так, студенты осваивают этапы компьютерного моделирования на практических занятиях и обсуждаются результаты семинарах.

**8. Критерии оценки компьютерного моделирования.** При построении компьютерной модели оценивается логика построения, дизайн, оригинальность, соответствие выводов имеющимся данным, значимость компьютерной модели, значимость найденного решения в будущей профессиональной деятельности (таксономия Блума). Таксономия Биньямина Блума включает 6 категорий целей обучения): 1) знание (запоминание, воспроизведение информации),

2) понимание (трансляция, интерпретация, предположения, объяснение информации), 3) применение знаний в похожей ситуации, 4) анализ – решение проблем, 5) синтез – нахождение ответов (из разных источников), передача опыта, формирование и проверка гипотезы, 6) оценка, выводы, критические суждения.

**9. Развитие информационно-технологической компетентности.** Компьютерное моделирование расширяет возможности и функции преподавателя, активизирует интерес к процессу обучения, улучшает его качество, так как повышается восприятие изучаемого материала, и добавляет новые технологии в дидактический процесс. Осваивая этапы компьютерного моделирования, студенты конструируют анатомические объекты и структуры на основе компьютерных моделей визуализации, проводят анализ полученных результатов и формируют готовность решать конкретную задачу, развивают технологии работы с офисным программным обеспечением, подготовки научных отчетов и презентаций.

Перечислим технологические приемы, которые способствуют развитию информационно-технологической компетентности:

- технология поиска, обработки и передачи информации;
- построение информационных моделей;
- построение структурных и структурно-функциональных моделей и систем;
- технологии работы с базами знаний анатомической терминологии;
- освоение обучающего и научного программного обеспечения VOXEL MAN 3D Navigator, анатомического портала Primal Pictures для решения учебных задач;
- технологии компьютерного моделирования;
- освоение расширенных возможностей офисных пакетов Microsoft Word и Power Point, графического пакета Microsoft Visio;
- технологии подготовки научных отчетов и презентаций;
- технологии конструирования анатомических объектов и структур на основе компьютерных моделей визуализации.

Компьютерное моделирование становится новым инструментом, методом научного познания, новой технологией из-за возрастающей необходимости перехода от исследования *линейных* математических *моделей* систем к исследованию сложных и нелинейных математических моделей систем, анализ которых гораздо сложнее.

**10. Заключение.** Методика обучения студентов медицинских специальностей компьютерному моделированию позволяет широко использовать информационную среду. Предложенную методику обу-

чения можно рассматривать как составляющую всей методической системы профессиональной подготовки будущих врачей. Курс компьютерного моделирования помогает решать учебные задачи дисциплины «Анатомия»: ориентироваться в сложном строении тела человека, раскрыть взаимосвязь и взаимозависимость отдельных частей организма, а также способствует формированию и развитию компетенций в области компьютерных и информационных технологий.

Перечислим положительные моменты использования компьютерных образовательных технологий в учебном процессе: доступность достоверной, наглядной, актуальной и полезной информации; минимальные затраты времени на поиск информации; развитие системного мышления, инициативности и рефлексии; демонстрация своей работы (плаката, презентации, проекта, доклада, модели) на семинаре и дальнейшее ее коллективное обсуждение [9].

Достоверность и обоснованность разработанной методики обучения студентов медицинских специальностей подтверждается обработкой полученных результатов педагогического эксперимента методами проверки статистических гипотез [7] и практической реализацией элементов разработанной методики [9].

### Литература

1. *Баранова Е.В., Симонова И.В.* Развитие информационно-технологической компетентности студента в системе педагогического образования. URL: [http://lib.herzen.spb.ru/text/baranova\\_9\\_158\\_168.pdf](http://lib.herzen.spb.ru/text/baranova_9_158_168.pdf)
2. *Болотов В.А., Сериков В.В.* Компетентностная модель: от идеи к образовательной программе // Педагогика. 2003. № 10. С. 8–14.
3. *Громова Л.А.* Этика управления : учебно-методическое пособие // СПб.: изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2007. URL: <http://goo.gl/qaAfY5>.
4. *Бордовский Г.А., Готская И.Б., Ильина С.П., Снегурова В.И.* Использование электронных образовательных ресурсов нового поколения в учебном процессе: научно-методические материалы // СПб., 2007. 32 с.
5. *Макарова Н.В., Волков В.Б.* Информатика: учебник для вузов // СПб.: Питер. 2011. 576 с.
6. *Мысин М.Н.* Использование информационных технологий в процессе формирования профессиональных компетенций будущего специалиста // Самара: Изд-во Самарский ун-т, 2004. 194 с.
7. *Никонова М.Л., Пичугин Ю.А., Карелина Н.Р.* Новые образовательные технологии и оценка статистической надежности обучения студентов // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, 2013. № 154. С. 138–145.
8. *Никонова М.Л., Пичугин Ю.А., Карелина Н.Р.* Компьютерные модели в учебном процессе // Санкт–Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления (СПОИСУ). Труды международной конференции «Региональная информатика» (г. Санкт–Петербург. 24–26 октября 2012). СПб, 2013. С. 282–287.
9. *Никонова М.Л.* Компьютерные модели визуализации медицинской информации в практике изучения дисциплины «Анатомия человека» // Научно–

- технические ведомости Санкт–Петербургского государственного политехнического университета, серия Гуманитарные и общественные науки. СПб, 2013.
10. Педагогика: учебное пособие для студентов педагогических вузов и педагогических колледжей / Под ред. П.И. Пидкасистого. // М.: Педагогическое общество России, 1998. 640 с.
  11. Пупырев Н.П. Педагогические возможности компьютерных моделей // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 6. С. 68–69. URL: <http://goo.gl/vi7pU>.
  12. Федеральный государственный образовательный стандарт URL: <http://standart.edu.ru/catalog.aspx?CatalogId=6408>
  13. Фокин Р.Р. Методология обучения информатики в высшей школе: автореф. дис. доктор пед. наук: 13.00.02 // СПб., 2000.

## References

1. Baranova E.V., Simonova I.V. *Razvitie informacionno-tehnologicheskoy kompetentnosti studenta v sisteme pedagogicheskogo obrazovaniya* [The development of informational and technological competence in pedagogical education]. Available at: [http://lib.herzen.spb.ru/text/baranova\\_9\\_158\\_168.pdf](http://lib.herzen.spb.ru/text/baranova_9_158_168.pdf). (In Russ.).
2. Bolotov V.A., Serikov V.V. [Competence-based model: from idea to an educational program]. *Pedagogika – Pedagogy*. 2003. no 10. pp. 8–14. (In Russ.).
3. Gromova L.A. [Ethics of management: tutorial]. SPb.: izd-vo RGPU im. A. I. Gercena, 2007. Available at: <http://goo.gl/qaAfY5>. (In Russ.).
4. Bordovskij G.A., Gotskaja I.B., Il'ina S.P., Snegurova V.I. *Ispol'zovanie jelektronnyh obrazovatel'nyh resursov novogo pokolenija v uchebnom processe: nauchno-metodicheskie materialy* [The use of electronic educational resources of the new generation in the educational process: research and teaching materials]. SPb., 2007. 32 p. (In Russ.).
5. Makarova N.V., Volkov V.B. *Informatika: uchebnik dlja vuzov*. [Computer science: a textbook for higher school]. SPb, Piter, 2011. 576 p. (In Russ.).
6. Mysin M.N. *Ispol'zovanie informacionnyh tehnologij v processe formirovaniya professional'nyh kompetencij budushhego specialista* [Use of information technologies in formation of professional competence of specialist]. Samara: Izd-vo Samarskij un-t, 2004. 194 p. (In Russ.).
7. Nikonorova M.L., Pichugin Ju.A., Karelina N.R. [New educational technologies and the assessment of the statistical reliability of student learning]. *Izvestija Rossijskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gercena – Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*. 2013. no 154. pp. 138–145. (In Russ.).
8. Nikonorova M.L., Pichugin Ju.A., Karelina N.R. [Computer models in the educational process]. *Sankt–Peterburgskoe Obshhestvo informatiki, vychislitel'noj tehniki, sistem svyazi i upravlenija (SPOISU). Trudy mezhdunarodnoj konfe-rencii «Regional'naja informatika» (g. Sankt–Peterburg. 24–26 oktjabrja 2012)* [St. Petersburg Society of informatics, computing, communications and control systems. Proceedings of the inter-regional conference «Regional informatics», St. Petersburg, October 24–26 2012]. SPb, 2013. pp. 282–287. (In Russ.).
9. Nikonorova M.L. [Computer models of medical information visualization in Human Anatomy practical training]. *Nauchno–tehnicheckie vedomosti Sankt–Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta, serija Gumanitarnye i obshhestvennye nauki – St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Humanities and Social Sciences*. SPb, 2013. (In Russ.).
10. *Pedagogika: uchebnoe posobie dlja studentov pedagogicheskikh vuzov i pedagogicheskikh kolledzhej*. [Pedagogy: a textbook for students of pedagogical universities and colleges]. Edited by PIdkasytj P.I. M.: Pedagogicheskoe obshhestvo Rossii, 1998. 640 p. (In Russ.).

11. Pupyrev N.P. [Pedagogical benefits of computer models]. *Sovremennye naukoemkie tehnologii – Modern high technologies*. 2004. no 6. pp.68-69. Available at: <http://goo.gl/vi7pU>
12. *Federal'nyj gosudarstvennyj obrazovatel'nyj standart* [Federal state educational standard]. Available at: URL: <http://standart.edu.ru/catalog.aspx?CatalogId=6408>
13. Fokin R.R. *Metodologija obuchenija informatiki v vysshej shkole: avtoref. dis. doktor ped. nauk: 13.00.02* [Methodology of teaching computer science in higher school: thesis abstract for the degree of Doctor of Pedagogical Sciences]. SPb., 2000.

**Никонорова Маргарита Леонидовна** — заведующая кабинетом кафедры анатомии человека Санкт–Петербургского государственного педиатрического медицинского университета (СПбГПМУ). Область научных интересов: компьютерное моделирование, интерактивное обучение, методика преподавания информатики. Число научных публикаций — 22. [nikml@yandex.ru](mailto:nikml@yandex.ru), [www.gpma.ru](http://www.gpma.ru); Литовский ул., дом 2, Санкт-Петербург, 194100, РФ; р.т. +7(812)4165238.

**Nikonorova Margarita Leonidovna** — managing an office of Human Anatomy Department Saint-Petersburg State Pediatric Medical University. Scientific interests: computer modeling, interactive learning, methods of teaching informatics. Number of publications — 22; [nikml@yandex.ru](mailto:nikml@yandex.ru); Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, 2 Litovskaya st., 194100, St. Petersburg, Russia; office phone +7(812)4165238.

**Пичугин Юрий Александрович** — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры геометрии Российского педагогического университета (РГПУ) им. А.И. Герцена. Область научных интересов: разработка и использование статистических и динамических моделей для анализа и прогноза нестационарных многомерных временных рядов. Число научных публикаций — 97; РГПУ им. А.И. Герцена, ул. Казанская 6, 191186, Санкт-Петербург, РФ; р.т. +7(812)314-49-96 (доб. 21-19)

**Pichugin Yury Alexandrovich** — Ph.D., D.Sci., Professor of Herzen State Pedagogical University of Russia (The Department of Geometry). Scientific interests: designing and use of statistical and dynamical models for multidimensional non-stationary time-series analysis and forecast. Number of publications — 97; [yury-pichugin@mail.ru](mailto:yury-pichugin@mail.ru); Herzen State Pedagogical University of Russia, 6 Kazanskaya st. 191186, St. Petersburg, Russia; office phone +7(812)314-49-96 (add. 21-19).

**Тишков Артем Валерьевич** — к-т. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник СПИИРАН. Область научных интересов: анализ биомедицинских данных методами раскопки данных и статистическими методами. Число научных публикаций — 62; [artem.tishkov@gmail.com](mailto:artem.tishkov@gmail.com); СПИИРАН, 14-я линия ВО 39, 199178, Санкт-Петербург, РФ; м.т. +7(921)952-91-85.

**Tishkov Artem Valerievich** — Ph.D., senior researcher in SPIIRAS. Scientific interests: analysis of biomedical data using Data Mining and statistical methods. Number of publications — 62; [artem.tishkov@gmail.com](mailto:artem.tishkov@gmail.com); SPIIRAS, 14<sup>th</sup> line VO 39, 199178, St. Petersburg, Russia; mob. +7(921)952-91-85.

## РЕФЕРАТ

### *Никоорова М.Л., Пичугин Ю.А., Тишков А.В. Методика обучения студентов медицинских специальностей компьютерному моделированию.*

В настоящее время использование активных методов обучения регламентировано федеральными государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования. Разработанная методика обучения студентов – будущих врачей компьютерному моделированию ориентирована на повышение уровня информационно-технологической компетентности студентов. В рамках поставленных задач выделены виды учебной деятельности студентов и технологические приемы, способствующие освоению знаний и развитию информационно-технологической компетентности. Ведущими *принципами отбора содержания обучения* являются междисциплинарность, научность, практико-ориентированность, систематичность и последовательность изложения.

*Содержание* тематических направлений обучения определяются через перечень понятий, определенных стандартом среднего (полного) общего образования по информатике, освоение графического редактора Microsoft Visio, дополнительных возможностей Microsoft Word, овладение технологией работы с обучающим и научным медицинским программным обеспечением. *Средства обучения* включают обучающее и научное программное обеспечение VOXEL MAN, анатомический портал Primal Pictures, прикладные офисные программы Microsoft Word и Microsoft Visio. Выбор средств информационных технологий определяется учебными задачами, так же средства информационных технологий являются инструментом разработки и представления практических работ студентов. Формирование компетенций опирается на *активные методы обучения*, так компьютерное моделирование является игровой моделью профессиональной деятельности, методом решения задачи анализа или синтеза сложной системы на основе использования ее компьютерной модели (Н.В. Макарова). При проведении компьютерного моделирования выделяется 4 этапа. 1 этап – постановка задачи: описание задачи, цель моделирования, формализации задачи. 2 этап – разработка модели: создание информационной модели, компьютерной модели. 3 этап – компьютерный эксперимент: план эксперимента, тестирование модели, проведение эксперимента. 4 этап – анализ результатов моделирования (Н.В. Макарова). При построении компьютерной модели оценивается логика построения, дизайн, оригинальность, соответствие выводов имеющимся данным, значимость компьютерной модели, значимость найденного решения в будущей профессиональной деятельности (таксономия Блума).

Студенты осваивают этапы компьютерного моделирования *на практических занятиях* и обсуждаются результаты *семинарах*, конструируют анатомические объекты и структуры на основе компьютерных моделей визуализации, проводят анализ полученных результатов и формируют готовность решать конкретную задачу, развивают технологии работы с офисным программным обеспечением, подготовки научных отчетов и презентаций. Компьютерное моделирование расширяет возможности и функции преподавателя, активизирует интерес к процессу обучения, улучшает его качество. Достоверность и обоснованность разработанной методики обучения студентов медицинских специальностей подтверждается обработкой полученных результатов педагогического эксперимента методами проверки статистических гипотез и практической реализацией элементов разработанной методики.

## SUMMARY

### *Nikonorova M.L., Pichugin Y.A., Tishkov A.V.* **Methodology of teaching medical students of computer modeling.**

At present implementation of active teaching methods is required by the federal state educational standards of higher professional education. The developed methodology of teaching medical students computer modeling is designed to increase students' level of information and technological competence. As part of the set tasks learning activities of students and technological methods contributing to knowledge acquisition and information technology skills development are identified. Main principles of learning content selection include interdisciplinarity, scientific rigour, practical awareness, systematicity and consistency of presentation.

Theme-lines content is determined by a list of concepts defined by standard of secondary complete general education in Informatics and demands acquirement of Microsoft Visio and special resources of Microsoft Word, mastery of operation principles of educational and scientific medical software. Teaching tools include educational and scientific software VOXEL MAN, human anatomy website Primal Pictures, application programs Microsoft Word and Microsoft Visio. Selection of information technologies is defined by teaching objectives, as they are a tool for development and presentation of students' practical works. Competence formation is based on active teaching methods, therefore computer modeling is the game model of professional activity and a tool for solving problems of analysis and synthesis of complex systems based on the use of its computer model. There are 4 stages in computer modeling. Stage 1 – setting a goal: problem description, purpose of modeling, formulation of the task. Stage 2 – model development: creation of information model and computer model. Stage 3 - computer experiment: planning the experiment, testing models, experiment realization. Stage 4 - simulation results analysis (N.V. Makarova). When creating a computer model the logic of modeling, design, originality, compliance of findings to the available data, the importance of the computer model and the importance of the solution found in the future professional activity are assessed (Bloom's taxonomy).

Students acquire the stages of computer modeling at practical lessons and discuss the results at seminars. They design anatomical objects and structures on the basis of computer render models, analyze the results and get ready to solve the tasks. Students develop skills of work with office software, scientific reporting and presenting. Computer modeling extends teachers' opportunities and functions, activates interest in the learning process and improves its quality. Reliability and validity of the developed methods of teaching medical students are verified by processing the results of the pedagogical experiment with methods of testing statistical hypotheses and practical realization of the elements of the developed methodology.

А.А. КРИЖАНОВСКИЙ, А.В. СМИРНОВ, В.М. КРУГЛОВ,  
Н.Б. КРИЖАНОВСКАЯ, И.С. КИПЯТКОВА  
**АВТОМАТИЧЕСКОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ СЛОВАРНЫХ ПОМЕТ ИЗ  
РУССКОГО ВИКИСЛОВАРЯ**

---

*Крижановский А.А., Смирнов А.В., Круглов В.М., Крижановская Н.Б., Кипяткова И.С.*  
**Автоматическое извлечение словарных помет из Русского Викисловаря.**

**Аннотация.** Разработана методология извлечения словарных помет из интернет-словарей. В соответствие с этой методологией экспертами построено отображение (соответствие один к одному) системы словарных помет Русского Викисловаря (385 помет) и системы словарных помет Английского Викисловаря (1001 помета). Таким образом, построена интегральная система словарных помет (1096 помет), включающая пометы обоих словарей. Разработан синтаксический анализатор (парсер), который распознаёт и извлекает известные и новые словарные пометы, сокращения и пояснения, указанные в начале текста значений слов в словарных статьях Викисловаря. Следует отметить наличие в парсере большого количества словарных помет известных заранее (385 словарных помет для Русского Викисловаря). С помощью парсера на основе данных Русского Викисловаря была построена база данных машиночитаемого Викисловаря, включающая информацию о словарных пометах. В работе приводятся численные параметры словарных помет в Русском Викисловаре, а именно: с помощью разработанной программы было подсчитано, что в базе данных машиночитаемого Викисловаря к 133 тыс. значений слов приписаны пометы и пояснения; для полутора тысяч значений слов был указан регион употребления слова, подсчитано число словарных помет для разных предметных областей. Вкладом данной работы в компьютерную лексикографию является оценка численных параметров словарных помет в больших словарях (пятьсот тысяч словарных статей).

**Ключевые слова:** вычислительная лингвистика, компьютерная лексикография, русский язык.

*Krizhanovsky A.A., Smirnov A.V., Kruglov V. M., Krizhanovskaya N.B., Kipyatkova I.S.*  
**Automatic extraction of context labels from the Russian Wiktionary.**

**Abstract.** The methodology of extracting context labels from internet dictionaries was developed. In accordance with this methodology experts constructed a mapping table that establishes a correspondence between Russian Wiktionary context labels (385 labels) and English Wiktionary context labels (1001 labels). As a result the composite system of context labels (1096 labels), which includes both dictionary labels, was constructed. The parser extracting context labels from the Russian Wiktionary was developed. The parser can recognize and extract new context labels, abbreviations and comments placed before the definition in Wiktionary articles. One outstanding feature of this parser is a large number of context labels which are known in advance (385 context labels for Russian Wiktionary). The parser can recognize and extract new context labels, abbreviations and comments placed before the definition in Wiktionary articles. The database of machine-readable Russian Wiktionary including context labels was generated by the parser. An evaluation of numerical parameters of context labels in the Russian Wiktionary was performed. With the help of the developed computer program it was found in the Russian Wiktionary that (1) there are 133 000 definitions with context labels and comments, (2) one and a half thousand definitions were supplied with regional labels, (3) it was calculated a number of definitions with labels for each domain knowledge. This paper is an original contribution to computational lexicography, setting out for the first time an analysis of numerical parameters of context labels in the large dictionary (500 000 entries).

**Keywords:** computational linguistics, computational lexicology, Russian language.

---

**1. Введение.** Викисловарь (<http://ru.wiktionary.org/>) — это свободно пополняемый многофункциональный многоязычный онлайн-

словарь и тезаурус. В Викисловаре содержатся толкования и переводы слов, описание фонетических и морфологических свойств, семантические (парадигматические) отношения. В словарных статьях приводится произношение слов (указана транскрипция и даны ссылки на аудиофайлы с произношением), правила разбиения слов на слоги, ударения в словах, информация об этимологии слов.

Для использования данных викисловарей при решении задач автоматической обработки текста и речи необходимо преобразовывать тексты словарных статей — слабоструктурированные данные — в машиночитаемый формат. Построение машиночитаемого словаря на основе данных викисловарей является комплексной задачей, рассчитанной не на один десяток лет. В настоящее время созданный синтаксический анализатор (парсер) позволяет извлекать из Английского и Русского Викисловарей следующую информацию: языковую и частеречную принадлежность лексических единиц, дефиниции значений и отдельные семантические компоненты, иллюстративный материал (цитаты и речения — пока только из Русского Викисловаря), а также иноязычные соответствия (переводы значений слов). Здесь и далее название конкретного проекта (Английский Викисловарь, Русский Викисловарь) пишется с заглавной буквы, название вообще словарей данного типа, т.е. викисловарей, пишется с маленькой буквы.

В этой публикации представлены результаты очередного этапа работ по проектированию и разработке синтаксического анализатора. Речь идет об извлечении из Русского Викисловаря лексикографических помет разного типа.

Словарные пометы — это используемые в тексте словарной статьи краткие указания на характеристики описываемой леммы — грамматические и стилистические. Грамматические пометы указывают на частеречную принадлежность слова, дают информацию о грамматической форме и грамматическом значении. Стилистические пометы заслуживают особого внимания, так как включают в себя несколько подтипов [1, 2, 3, 4].

Во-первых, это пометы, указывающие на стилистическую ограниченность употребления слов, относящихся к литературному языку (*офиц.*, *офиц.-дел.*, *разг.*, *книжн.*, *высок.*, *трад.-поэт.*, *народно-поэт.*). Так, например, помета *офиц.* (официальное) указывает на то, что слово (или значение), имеющее эту помету, характерно для официальных текстов разного характера, а помета *разг.* (разговорное) указывает на то, что слово (или значение) употребляется в живой, непринужденной, преимущественно устной, речи.

Во-вторых, это пометы, указывающие специальную область применения слова — пометы предметных областей (*гидрол., горн., мисер.* и т. д.).

В-третьих, это пометы, указывающие на принадлежность слова, находящегося на границе или за пределами литературного языка, к различным пластам лексики (*обл., прост., груб.-прост.*). Так, например, помета *прост.* указывает на то, что слово (или значение) из-за грубости содержания или резкости выражаемой оценки стоит на границе литературного языка и употребляется в сниженном стиле, в обиходной, бытовой речи.

Кроме названных трёх типов помет, характеризующих прагматическую часть лексического значения слова, выделяют еще несколько:

- экспрессивные пометы, указывающие на эмоциональную окраску слова (*пренебр., неодобр.*); экспрессивные пометы далее будут описаны более подробно;

- хронологические пометы, указывающие на временные рамки слов (например, слова, выходящие из употребления, и слова, появляющиеся в языке, обозначаются пометами *устар.* и *неол.*);

- региональные (областные) пометы, указывающие на территориальные рамки слов.

Успешное решение задачи извлечения словарных помет и создания машиночитаемого Викисловаря, включающего пометы, востребовано в различных направлениях вычислительной лингвистики. Например, для определения тематики текста необходим словарь с пометами предметных областей, для анализа тональности текста нужен словарь с экспрессивными пометами (разрабатываемый машиночитаемый Викисловарь может служить основой для создания тональных словарей [5]).

Статья имеет следующую структуру. Во второй главе рассматриваются машиночитаемые словари со словарными пометами. Особенности словарных помет викисловарей указаны в третьей главе. В четвёртой главе описана методология извлечения из викисловарей словарных помет. В пятой главе обсуждаются экспрессивные словарные пометы, и приводится «выровненный» список экспрессивных помет двух викисловарей. В шестой главе представлены численные результаты автоматического извлечения словарных помет из Русского Викисловаря.

**2. Состояние дел в проблемной области.** Построенный машиночитаемый словарь (<http://code.google.com/p/wikokit>) представляет интерес благодаря большому объёму данных и наличию в нём распо-

знанных словарных помет. Наиболее близким аналогом среди электронных словарей, включающих словарные пометы и находящихся в открытом доступе, является WordNet Domains. Различие состоит в том, что тезаурус WordNet Domains [6] содержит всего 170 помет, и эти пометы проставлены автоматически в отличие от помет в Викисловаре, где они указываются редакторами словаря вручную.

При решении задачи автоматического построения словарей специального типа, в которых к значениям слов приписаны словарные пометы, не обойтись без лексикографических онлайн-ресурсов, в первую очередь – викисловарей. Кроме словарных входов с толкованиями, семантическими отношениями и переводами, викисловарь содержит словарные пометы. Викисловарь превосходит WordNet Domains по следующим параметрам:

- большой объем и быстрое обновление материала (последнее особенно актуально для неологизмов);

- большое количество редакторов (сотни редакторов в Английском Викисловаре, десятки — в Русском Викисловаре), по всей видимости, обеспечивает более адекватное отражение языковой реальности (противоположностью являются словари, основанные на языковых представлениях небольшой группы лексикографов);

- как и другие проекты Web 2.0, викисловарь не может гарантировать качества данных (как замечают Мейер и Гуревич в работе [7]: “Wiktionary has as yet no reviewing or releasing workflow”), тем не менее внедряются механизмы, направленные на повышение качества словарных статей (см. [http://ru.wiktionary.org/Викисловарь:Проверка\\_страниц](http://ru.wiktionary.org/Викисловарь:Проверка_страниц)).

Существуют свободно распространяемые инструменты [8, 9], которые позволяют напрямую работать с викисловарем как с базой данных. В последнее время появляются проекты, которые ставят целью сравнить [7, 10] и интегрировать [11, 12, 13, 14] ворднеты и вики-словари.

Обзор доступной литературы подсказывает, что данная статья является первой, где выполнен комплексный анализ словарных помет в машиночитаемом словаре большого объема (пятьсот тысяч словарных статей).

**3. Особенности словарных помет викисловарей.** В среде редакторов Русского Викисловаря для обозначения словарных помет используется термин «условные сокращения» (в Английском Викисловаре – “Context labels”). Полный список условных сокращений Рус-

ского Викисловаря доступен онлайн (см. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Викисловарь:Условные\\_сокращения](https://ru.wikipedia.org/wiki/Викисловарь:Условные_сокращения)). Задача разрабатываемого синтаксического анализатора состоит в распознавании и извлечении условных сокращений и различных пояснений и комментариев при значениях слов.

Чтобы более чётко очертить решаемую задачу извлечения словарных помет, укажем на особенности помет Русского Викисловаря:

1. *Не только словарные пометы.* При значениях слов кроме словарных помет могут быть указаны различные *пояснения и комментарии* с помощью специального шаблона «помета» (см. фрагмент словарной статьи «улыбнуться» в следующем разделе). Эта информация относится к полю «словарные пометы и пояснения» и тоже должна извлекаться наравне с обычными словарными пометами.

2. *Открытый список.* В традиционных бумажных словарях список словарных помет представляет собой некоторую данность, которая уже не меняется после публикации словаря. В этом отношении вики-словари можно отнести к регулярно издаваемым словарям, изменение или расширение списка помет которого обсуждается и принимается редакторами викисловаря в рабочем порядке.

3. *Большой объём и глубокая детализация.* Викисловари создаются большими коллективами редакторов, каждый из которых является специалистом в какой-либо области знания. Для отнесения слов и терминов к этим областям вводятся всё новые пометы предметных областей. Например, в Английском Викисловаре на 2014 год около 370 помет предметных областей.

4. Существуют следующие зоны словарной статьи в Русском Викисловаре, где могут быть указаны пометы: (1) толкование, (2) семантические отношения, (3) переводы. В этой работе исследуются словарные пометы только в зоне толкования.

5. Редакторами викисловарей разработана система категорий словарных помет, призванная упорядочить и систематизировать словарные пометы, каждая помета относится к одной из категорий (рис. 1).

Наиболее детально на данный момент в Английском Викисловаре проработаны категории помет предметных областей (topical на рис. 1). Именно система категорий Английского Викисловаря была взята за основу при создании категорий помет машиночитаемого Викисловаря.

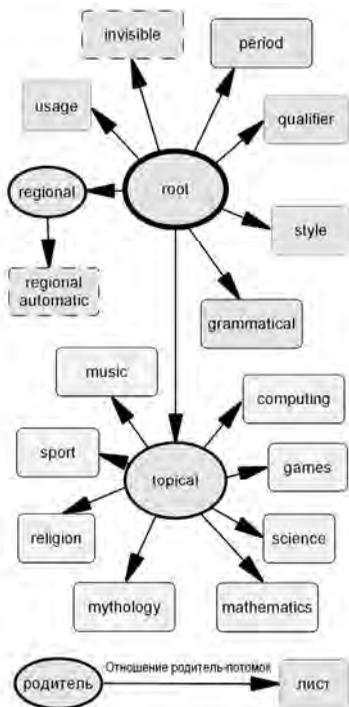


Рис. 1. Система категорий словарных помет в наиболее полном Английском Викисловаре

Пунктиром на рисунке 1 выделены две специальные группы помет машиночитаемого Викисловаря:

- *invisible* — к этой категории отнесены специальные шаблоны Русского Викисловаря, которые (на основе параметров) формируют толкование (например, шаблоны `{{as ru}}`, `{{=}}`, `{{свойство}}`, `{{состояние}}`, `{{соотн.}}`, `{{действие}}`, `{{совершить}}`); конструкция в двойных фигурных скобках называется шаблоном. Чтобы ознакомиться с работой шаблона, нужно набрать в адресной строке [https://ru.wikipedia.org/wiki/Шаблон:название\\_шаблона](https://ru.wikipedia.org/wiki/Шаблон:название_шаблона), где в качестве параметра «название\_шаблона» можно указать «свойство», «состояние» и т.д.

- *regional automatic* — региональные пометы задаются в виде параметра у шаблона `{{reg.}}`, например, `{{reg.|пск.}}`, `{{reg.|твер.}}`, `{{reg.|смол.}}`. Интересная особенность этой группы помет в том, что хотя в этом шаблоне пометы задаются свободным текстом, но распознаются как пометы, принадлежащие конкретной категории — *regio-*

нальной. Все прочие пометы, задаваемые произвольным текстом с помощью шаблона {{помета}}, имеют в машиночитаемом Викисловаре пустое значение в поле «категория пометы».

**4. Методология извлечения помет.** Рассмотрим словарную статью «улыбнуться» из Русского Викисловаря (см. <https://ru.wiktionary.org/wiki/улыбнуться>), а именно фрагмент статьи с толкованиями, содержащими словарные пометы и пояснения:

4. *перен., разг.*, часто с частицей «не» повезти, достаться, стать предметом обладания ◆ Но и второе место бразильцу не **улыбнулось** — за шестнадцать кругов до финиша его постигла та же участь, что и Райкконена. *Борис Мурадов, «Гран При Малайзии. Время разбрасывать крылья» // «Формула», 2002 г.*

5. *перен., разг., устар.* не достаться кому-либо; утратиться, исчезнуть, пропасть ◆ — Боюсь я, как бы урока мне не лишиться... ученица моя поговаривает, что отец её совсем из Петербурга хочет уехать. Пожалуй, двадцать-то пять рублей в месяц и **улыбнутся**. *М. Е. Салтыков-Щедрин, «Мелочи жизни», 1886—1887 г.*

В приведённом выше фрагменте видно, что условные сокращения предшествуют тексту, описывающему значение слова. В четвёртом значении слова указаны две пометы (*перен., разг.*) и одно пояснение (*о частом употреблении с частицей «не»*). В пятом значении указаны три пометы (*перен., разг., устар.*). Повторим, что в задачу парсера входит извлечение из этого текста всех перечисленных помет и пояснений.

Сформулируем предпосылки, определившие методологию извлечения словарных помет:

- разрабатываемый синтаксический анализатор в перспективе должен уметь извлекать данные не только из Русского Викисловаря, но и Английского Викисловаря;
- база данных машиночитаемого Викисловаря должна автоматически наполняться данными, извлекаемыми парсером из Викисловаря;
- структура базы данных машиночитаемого Викисловаря должна быть одинаковой для разных исходных викисловарей (это обеспечивает унификацию полученных данных);
- несколько сотен словарных помет Русского Викисловаря и около тысячи словарных помет Английского Викисловаря известны заранее (например, пометы *перен., разг., устар.* из примера выше), этот список составлен редакторами Викисловаря и доступен онлайн;
- существует открытый список помет и пояснений; объём этого списка (до построения машиночитаемого Викисловаря) неизвес-

тен (например, пояснение «часто с частицей “не”» из примера выше относится к этому списку).

С учётом этих предпосылок и с учётом особенностей словарных помет викисловарей (см. предыдущий раздел) методология извлечения словарных помет включает следующие этапы:

1. соотнесение помет Английского Викисловаря и Русского Викисловаря;
2. добавление информации о пометах (и их соответствия в разных викисловарях) и их категориях в базу знаний парсера;
3. разработка синтаксического анализатора;
4. автоматическое создание базы данных машиночитаемого Викисловаря с помощью синтаксического анализатора;
5. публикация списка извлечённых помет, обсуждение результатов с редакторами викисловаря;
6. исправление найденных ошибок в статьях викисловаря;
7. расширение/изменение списка словарных помет в базе знаний синтаксического анализатора, исправление ошибок в самом анализаторе;
8. переход к шагу 4.

На первом этапе экспертами построено отображение (соответствие один к одному) системы словарных помет Русского Викисловаря (385 помет) и системы словарных помет Английского Викисловаря (1001 помет). В таблице 1 представлен пример такого «выравнивания»: для четырёх помет указаны пары соответствий, для трёх помет Английского Викисловаря не оказалось пары в Русском Викисловаре. Интегральная система словарных помет, включающая пометы обоих словарей, содержит 1096 словарных помет.

При соотнесении помет и при указании категорий (на первом и втором этапе) были выявлены неточности и ошибки в самом словаре, для решения которых привлекались редакторы Английского Викисловаря. В случае трудностей при «выравнивании» помет разных словарей вопросы также выносились на обсуждение с редакторами.

Синонимами словарных помет будем называть такие пары помет викисловаря, которые обозначают одно и то же, например, «ед. ч.» и «ед.», «мн. ч.» и «мн.», «собир.» и «собирает.» и др. Полный список словарных помет и их синонимов доступен онлайн для Русского Викисловаря (см. [http://code.google.com/p/wikokit/source/browse/trunk/common\\_wiki/src/wikokit/base/wikt/multi/ru/name/LabelRu.java](http://code.google.com/p/wikokit/source/browse/trunk/common_wiki/src/wikokit/base/wikt/multi/ru/name/LabelRu.java)) и Английского Викисловаря (см. [http://code.google.com/p/wikokit/source/browse/trunk/common\\_wiki/src/wikokit/base/wikt/multi/en/name/LabelEn.java](http://code.google.com/p/wikokit/source/browse/trunk/common_wiki/src/wikokit/base/wikt/multi/en/name/LabelEn.java)). Разным синонимичным словарным пометам, извлечённым из

словаря, в машиночитаемом Викисловаре ставится в соответствие ровно одна помета — та, которая официально указана на странице «Условных сокращений» Русского Викисловаря. Таким образом, разнотипной и разнообразной исходных слабоструктурированных данных викисловарей приводятся к единому формализованному виду, представленному в машиночитаемом Викисловаре.

Таблица 1. Фрагмент сопоставления словарных помет Русского Викисловаря и Английского Викисловаря

Английский Викисловарь	Русский Викисловарь		
	краткая	полная форма	примеры словарных статей
beaucroatic	канц.	канцелярское	быть на замечании, взимать
formal	офиц.	официальное	адресант, доложить
high-register	высок.	высокое	борение, изрекать
literary	книжн.	книжное	дефиниция, малодушие
hypercorrect	—	—	—
hyperbolic	—	—	—
loosely	—	—	—

На пятом шаге извлечённые словарные пометы и различная дополнительная информация (например, число помет разных категорий) опубликованы на странице Русского Викисловаря (см. [https://ru.wiktionary.org/wiki/User:АКА\\_MBG/Статистика:Пометы](https://ru.wiktionary.org/wiki/User:АКА_MBG/Статистика:Пометы)). Такая публикация результатов, во-первых, позволяет редакторам найти ошибки в словарных статьях (например, опечатки в написании словарных помет) и исправить их (шестой шаг). Во-вторых, позволяет увидеть высокочастотные пометы, которые ещё не внесены в базу знаний парсера (см. таблицу “*Labels found by parser*” на той же странице, для сортировки помет по частоте употреблений следует щёлкнуть мышкой по колонке “Counter”). Добавление этих помет в базу парсера будет седьмым шагом.

Таким образом, данная методология описывает итеративный процесс, который приближает нас к цели — точному и максимально полному представлению данных викисловаря в машиночитаемой форме.

**5. Экспрессивные пометы.** В связи с актуальностью задачи «анализ тональности текста» (англ. *sentiment analysis*) особое значение приобретает наличие в словаре экспрессивных помет. Пометы, указывающие на эмоциональную окраску слова, являются важным дополнительным источником информации при автоматическом анализе текстов в современных рекомендующих системах, учитывающих мнения (групп) независимых пользователей — участников социальных се-

тей [15]. В таблице 2 представлено 26 экспрессивных помет Русского и Английского Викисловарей, выровненных относительно друг друга.

Таблица 2. Сопоставление помет Русского Викисловаря и Английского Викисловаря, указывающих на эмоциональную окраску слова (экспрессивные пометы)

Английский Викисловарь	Русский Викисловарь	
	краткая	полная форма
abusive	бранн.	бранное
acerbity	груб.	грубое
augmentative	увелич.	увеличительное
contemptuous	презр.	презрительное
corroborative	усилит.	усилительное
derogatory	унич.	уничижительное
diminutive	уменьш.	уменьшительное
diminutive hypocoristic	умласк.	уменьшительно-ласкательное
dysphemism	дисфм.	дисфемизм
elevated	высок.	высокое
endearing	ласк.	ласкательное
euphemistic	эвф.	эвфемизм
expressive	экспр.	экспрессивное
familiar	фам.	фамильярное
humorously	шутл.	шутливое
low style	сниж.	сниженное
obscene language	мат	матерное
offensive	—	—
pejorative	неодобр.	неодобрительное
reproach	укор.	укорительное
rhetoric	ритор.	риторическое
sarcastic	ирон.	ироничное
scornful	пренебр.	пренебрежительное
solemn	торж.	торжественное
tabooed	табу	табуированное
vulgar	вульг.	вульгарное

Для экспрессивной пометы “offensive” Английского Викисловаря не было найдено соответствия в Русском Викисловаре, поэтому в таблице стоит прочерк. Для всех словарных помет Русского Викисловаря соответствия в английской редакции Викисловаря были найдены.

**6. Результаты автоматического извлечения словарных помет из Русского Викисловаря.** Синтаксический анализатор расширен модулем для автоматического извлечения словарных помет из Русского Викисловаря. В ходе работы данного модуля по данным на август

2013 г. было обработано 482 тыс. статей Русского Викисловаря и была извлечена следующая информация (см. [http://ru.wiktionary.org/wiki/User:AKA\\_MBG/Статистика:Пометы](http://ru.wiktionary.org/wiki/User:AKA_MBG/Статистика:Пометы)):

- всего уникальных сокращений, помет и пояснений 3316, из них в синтаксический анализатор добавлено вручную 385 помет, а 2931 сокращений, помет и пояснений найдено парсером автоматически;

- к 133 тыс. значений слов в словаре приписаны пометы и пояснения;

- в десятку наиболее употребимых условных сокращений вошли 18662 употреблений «прич.» (причастие), 11129 «перен.» (переносное значение), 10995 «разг.» (разговорное), 7085 «зоол.» (зоологическое), 4727 «=» (обозначение полной синонимии), 4687 «устар.» (устаревшее), 4413 «анат.» (анатомическое), 3991 «ботан.» (ботаническое), 3172 «хим.» (химическое), 2715 «мед.» (медицинское).

- автоматически выделены региональные (областные) пометы у значений слов. Всего найдено 109 уникальных региональных помет. Самые частотные пометы: «амер.» — американское (321 употр.), «брит.» — британское (112 употр.). Всего в Русском Викисловаре выявлено полторы тысячи значений слов (1661), для которых указан регион употребления слова.

Был выполнен подсчёт числа значений в словаре, помеченных словарными пометами разных категорий (рис. 1). Полученное число словарных помет разных категорий представлено на рисунке 2. Большую часть словарных помет (41%) составляют пометы, которые указывают на какую-либо предметную область (в словаре около 54 тыс. значений слов с такими пометами).

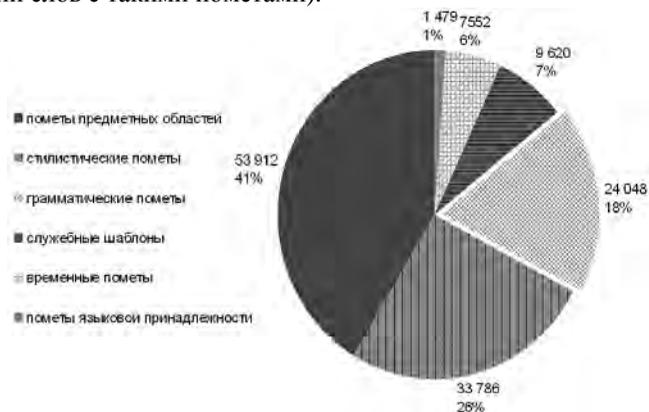


Рис. 2. Количество разных категорий словарных помет в Русском Викисловаре

Среди помет предметных областей больше всего используются научные пометы (18 тыс. употреблений, 33%), указывающие на какую-либо научную дисциплину (рис. 3). Наиболее полно представлена научная терминология по следующим предметам (больше тысячи терминов): зоология (7086 терминов), ботаника (3983), химия (3119), биология (1322), физика (1201). Значений слов с математическими пометами всего 1637 (рис. 3), сюда входят две пометы: «матем.» (математическое) и «геометр.» (геометрическое).

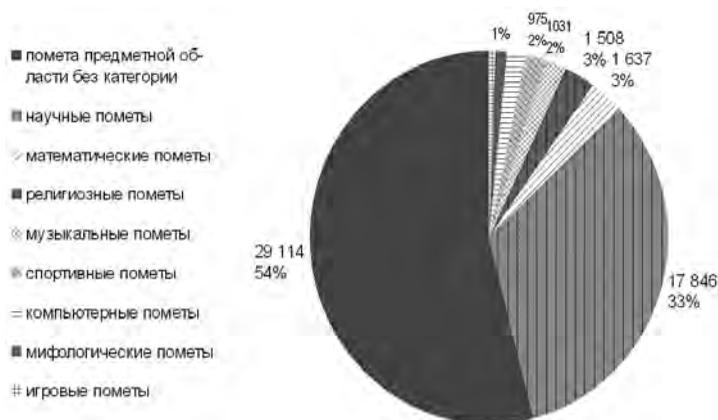


Рис. 3. Количество словарных помет разных предметных областей в Русском Викисловаре

На основе данных машиночитаемого Викисловаря можно получить число словарных статей с пометами и без них для любого из сотен языков Русского Викисловаря. В таблице 3 представлены эти данные для русских слов.

Таблица 3. Число словарных статей, содержащих словарные пометы, о русских словах в Русском Викисловаре (для разных частей речи)

Часть речи	Число статей		
	всего статей с непустыми значениями	без помет	с пометами
существительное	46780	25999	20781 44,4%
глагол	11353	3913	7440 65,5%
прилагательное	7991	3552	4439 55,6%
наречие	2036	431	1605 78,8%
Всего	68160	33895	34265 50,3%

Из этой таблицы видно, что примерно половина (50.3%) всех словарных статей о русских словах содержит словарные пометы. Несколько большая доля статей с пометами у наречий (78.8%) и глаголов (65.5%). Меньше всего словарных помет у существительных (44.4%), которые тем не менее по количеству (21 тыс.) превышают все остальные вместе взятые части речи. Более детальный анализ числа статей со словарными пометами представлен на следующем рисунке 4.

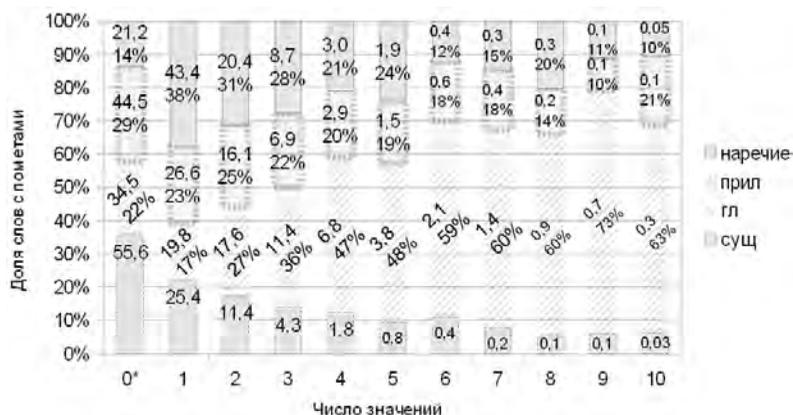


Рис. 4. Распределение числа словарных статей о русских словах с пометами по частям речи (существительное, глагол, прилагательное, наречие) и по числу значений на основе данных Русского Викисловаря

По оси абсцисс отложено число значений в словарной статье — от единицы до десяти. Встречаются статьи, у которых существенно больше значений (например, у глагола «тянуть» — 30 значений), но таких статей мало относительно их общего числа (всего 386 слов Русского Викисловаря (или 0.14%) имеют больше 10 значений). В нулевой столбце 0\* попали статьи, в которых может быть разное ненулевое число значений (от 1 до 10), но нет ни одной словарной пометы. В первом столбце подсчитаны словарные статьи, состоящие из одного значения, помеченного словарной пометой. Во втором столбце подсчитаны словарные статьи, содержащие два значения, при этом хотя бы одно значение (или оба сразу) содержат словарные пометы. И так далее.

Каждой части речи соответствует своя горизонтальная полоска прямоугольников, самая нижняя — существительные, вторая снизу (диагонально заштрихованная область, числа наклонные) — глаго-

лы, третья снизу (область обведена пунктиром) — прилагательные, самая верхняя (обведена тонкой линией) — наречия. Первые числа внутри столбцов указывают на пропорцию словарных статей с указанных числом значений для данной части речи. Например, из рисунка 4 видно, что существительных с одним значением, содержащим словарную помету, 25.4% от числа всех русских существительных с непустыми значениями (к сожалению, приходится акцентировать внимание на «непустых значениях», т.к. из 159 тыс. русских словарных статей в Русском Викисловаре 77 тыс. являются «заготовками», т.е. раздел с толкованиями пуст). На рисунке прекрасно видна ожидаемая закономерность, а именно: уменьшение пропорции всех четырёх частей речи при увеличении числа значений в словарных статьях.

Второе число со знаком процента внутри столбцов (назовём эти числа «доли долей») соответствует высоте столбцов и указывает долю слов данной части речи относительно долей других частей речи для словарных статей с заданным числом значений. Это второе число не указано для существительных (нижний ряд), т.к. его легко видеть с помощью значений оси ординат.

Анализ этой «доли долей» на рис. показывает интересные закономерности при росте числа значений (и, соответственно, уменьшении абсолютного числа слов):

- доля существительных и наречий постепенно снижается;
- доля прилагательных (второй ряд сверху) относительно долей других частей речи сохраняет стабильную пропорцию (14-25%);
- доля глаголов растёт от 20% до 60-70%.

Таким образом, число словарных статей о глаголах с большим количеством значений, содержащих словарные пометы, преобладает над числом многозначных статей (с пометами) о других частях речи. Эти результаты согласуются с предыдущими (см. рисунки 5 и 6 в работе [10]), где было подсчитано среднее число значений у многозначных слов для разных частей речи.

**7. Заключение.** Получены следующие основные результаты. Была разработана методология извлечения словарных помет из интернет-словарей. Построено соответствие между словарными пометами Русского Викисловаря (385 помет) и пометами Английского Викисловаря (более тысячи помет), что является необходимым этапом в решении задачи автоматической интеграции сверхбольших словарей (в обоих словарях суммарно более четырёх миллионов словарных статей).

Структура базы данных машиночитаемого словаря расширена таблицами для хранения данных о словарных пометах. Синтаксиче-

ский анализатор расширен модулем для автоматического извлечения словарных помет из Русского Викисловаря. С помощью синтаксического анализатора на основе данных Русского Викисловаря автоматически построена база данных машиночитаемого Викисловаря, включающая словарные пометы.

Спроектирована и разработана компьютерная система автоматического извлечения и учёта словарных помет онлайн-словарей на примере Русского Викисловаря. С помощью разработанной компьютерной программы было подсчитано, что в базе данных машиночитаемого Викисловаря к 133 тыс. значений слов в словаре приписаны пометы и пояснения. В Русском Викисловаре выявлено более полутора тысяч значений слов (1661), для которых указан регион употребления слова.

Наличие словарных помет в построенном машиночитаемом Викисловаре позволит автоматически определять тематику текста. Например, пометы «зоол.» (зоологическое), «анат.» (анатомическое), «ботан.» (ботаническое), «хим.» (химическое) и т.д. позволяют определить, к какой области знаний принадлежат научные термины в тексте. При этом необходимо будет особое внимание обращать на те многозначные слова, значения которых принадлежат разным предметным областям, например, «валентность» (*лингв., хим.*), «ветвление» (*ботан., прогр.*), «парадигма» (*филол., лингв.*).

С одной стороны, и по числу словарных статей, и по числу редакторов, и по другим параметрам Английский Викисловарь превосходит Русский Викисловарь, исследуемый в данной работе, примерно в 6-7 раз. С другой стороны, и по структуре словарной статьи, и по организации системы словарных помет между этими словарями есть много общего. Поэтому Русский Викисловарь является некоторым тестовым полигоном для последующей оценки различных численных параметров системы словарных помет многоязычного Английского Викисловаря и сравнения между собой этих двух викисловарей. Следующим этапом работ будет расширение синтаксического анализатора модулем для автоматического извлечения словарных помет из Английского Викисловаря.

Исходный код парсера и база данных машиночитаемого Викисловаря доступны с открытой лицензией на сайте проекта (<http://code.google.com/p/wikokit/>). Все, кто заинтересован в решении лингвистических задач и автоматической обработке текста с помощью машиночитаемого Викисловаря, могут рассчитывать на помощь авторов в работе с ним.

**Благодарности.** Мы благодарим сотрудников Института прикладных математических исследований КарНЦ РАН Огйико А. А., Чиркову Ю. В., Чиркова А. В., Головина А. С., Румянцева А. С. за работу по наполнению базы данных словарными пометами (обеспечившую возможность данного исследования) и за трудоёмкое «выравнивание» словарных помет Русского Викисловаря и Английского Викисловаря.

## Литература

1. *Скляревская Г.Н.* Еще раз о проблемах лексикографической стилистики // Вопросы языкознания. 1988. № 3. С. 84-97.
2. Словарь русского языка. Том I. А-Й. // М., 1981. С. 9.
3. *Сорокин Ю.С.* О нормативно-стилистическом словаре современного русского языка // Вопросы языкознания. 1967. № 5. С. 22-32.
4. *Токарчук И.Н.* Стилистические параметры в лексикографическом описании служебного слова (на примере частиц) // Вестник ТГПУ. 2012. Т. 1. №. 116. С. 187-191. URL: [http://vestnik.tspu.edu.ru/files/PDF/articles/tokarchuk\\_i\\_n\\_187\\_191\\_1\\_116\\_2012.pdf](http://vestnik.tspu.edu.ru/files/PDF/articles/tokarchuk_i_n_187_191_1_116_2012.pdf) (дата обращения 2.04.14).
5. *Пазельская А.Г., Соловьев А.Н.* Метод определения эмоций в текстах на русском языке // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной Международной конференции «Диалог» (Бекасово, 25 – 29 мая 2011 г.). М.: Изд-во РГГУ, 2011. Вып. 10 (17). С. 510-522. URL: <http://www.dialog-21.ru/digests/dialog2011/materials/en/pdf/50.pdf> (дата обращения 2.04.14).
6. *Gonzalez-Agirre A., Castillo M., Rigau G.* A graph-based method to improve WordNet Domains // In Proceedings of 13th International Conference on Intelligent Text Processing and Computational Linguistics (CICLING'12). New Delhi, India. 2012. URL: <http://adimen.si.ehu.es/~rigau/publications/cicling12-gcr.pdf> (дата обращения 2.04.14).
7. *Meyer Ch.M., Gurevych I.* Wiktionary: A new rival for expert-built lexicons? // там в шаблоне Exploring the possibilities of collaborative lexicography. Chapter 13, in Sylviane G., Paquot M. (eds.), *Electronic Lexicography*, Oxford University Press, Oxford, 2012. pp. 259 – 291.
8. *Zesch T., Müller Ch., Gurevych I.* Extracting lexical semantic knowledge from Wikipedia and Wiktionary // In Proceedings of the Conference on Language Resources and Evaluation (LREC). 2008. vol. 15.
9. *Крижановский А. А.* Преобразование структуры словарной статьи Викисловаря в таблицы и отношения реляционной базы данных. Препринт. 2010. URL: <http://scirepeople.com/publication/100231/> (дата обращения 2.04.14).
10. *Смирнов А. В., Круглов В. М., Крижановский А. А., Луговая Н. Б., Карнов А. А., Купяткова И. С.* Количественный анализ лексики русского WordNet и викисловарей // Труды СПИИРАН. 2012. Вып. 23. С. 231–253. URL: <http://scirepeople.com/publication/113406/> (дата обращения 2.04.14).
11. *Henrich V., Hinrichs E., Vodolazova T.* Semi-Automatic extension of GermaNet with sense definitions from Wiktionary // In Proceedings of 5th Language & Technology Conference (LTC 2011). Poznan, Poland, 2011. pp. 126-130. URL: [http://www.sfs.uni-tuebingen.de/ltd/documents/publications/Henrich-et-al-2011\\_GermaNet-Wiktionary-Mapping.pdf](http://www.sfs.uni-tuebingen.de/ltd/documents/publications/Henrich-et-al-2011_GermaNet-Wiktionary-Mapping.pdf) (дата обращения 23.02.14).

12. McCrae J., Montiel-Ponsoda E., Cimiano Ph. Integrating WordNet and Wiktionary with lemon // In Conference Proceedings “Linked Data in Linguistics”, 2012. pp. 25 - 34.
13. Meyer Ch.M., Gurevych I. What psycholinguists know about chemistry: Aligning Wiktionary and wordnet for increased domain coverage // In Proceedings of the 5th international joint conference on natural language processing (IJCNLP), Chiang Mai, Thailand, 2011. pp. 883–892.
14. Navigli R, Ponzetto S.P. BabelNet: The automatic construction, evaluation and application of a wide-coverage multilingual semantic network // Artificial Intelligence, 2012. vol. 193, pp 217-250.
15. Adomavicius G., Mobasher B., Ricci F., Tuzhilin A. Context-aware recommender systems // AI Magazine. 2011. vol. 32(3), pp. 67-80. URL: <http://www.ise.bgu.ac.il/faculty/liorr/recsys/bh/chcontext.pdf> (дата обращения 2.04.14).

## References

1. Sklyarevskaya G.N. [Once again about the problems of lexicographic style]. *Voprosy yazykoznaviya – Questions of Linguistics*. 1988. no 3. pp. 84-97. (In Russ.).
2. *Slovar' russkogo yazyka* [Russian dictionary]. vol I. A-J. M., 1981. P. 9. (In Russ.).
3. Sorokin Yu.S. [About normative stylistic dictionary of modern Russian]. *Voprosy yazykoznaviya – Questions of Linguistics*. 1967. no 5. pp. 22-32. (In Russ.).
4. Tokarchuk I.N. [Stylistic parameters in lexicographic description function word (particles)]. *Vestnik TGPU – TSPU Bulletin*. 2012. vol. 1. no. 116. pp. 187-191. Available at: [http://vestnik.tspu.edu.ru/files/PDF/articles/tokarchuk\\_i\\_n\\_187\\_191\\_1\\_116\\_2012.pdf](http://vestnik.tspu.edu.ru/files/PDF/articles/tokarchuk_i_n_187_191_1_116_2012.pdf) (In Russ.).
5. Pazelskaya A.G., Solovov A.N. [Sentiment analysis method for Russian texts]. *Kompyuternaya lingvistika i intellektualnyie tehnologii: Po materialam ezhegodnoy Mezhdunarodnoy konferentsii «Dialog»* [Conference Proceedings "Computational Linguistics and Intellectual Technologies"], 2011. pp. 510-522. <http://www.dialog-21.ru/digests/dialog2011/materials/en/pdf/50.pdf> (In Russ.).
6. Gonzalez-Agirre A., Castillo M. and Rigau G. A graph-based method to improve WordNet Domains. In Proceedings of 13th International Conference on Intelligent Text Processing and Computational Linguistics (CICLING'12). New Delhi, India. 2012. Available at: <http://adimen.si.ehu.es/~rigau/publications/cicling12-gr.pdf> (accessed: 2.04.14).
7. Meyer Ch.M., Gurevych I. Wiktionary: A new rival for expert-built lexicons? Exploring the possibilities of collaborative lexicography. Chapter 13, in Sylviane G., Paquot M. (eds.), *Electronic Lexicography*, Oxford University Press, Oxford. 2012. pp. 259–291.
8. Zesch T., Muller Ch., Gurevych I. Extracting lexical semantic knowledge from Wikipedia and Wiktionary. In Proceedings of the Conference on Language Resources and Evaluation (LREC). 2008. vol. 15.
9. Krizhanovsky A. A. Transformation of Wiktionary entry structure into tables and relations in a relational database schema. Preprint. 2010. Available at: <http://arxiv.org/abs/1011.1368> (accessed: 2.04.14).
10. Smirnov A., Kruglov V., Krizhanovsky A., Lugovaya N., Karpov A., Kipyatkova I. [A quantitative analysis of the Russian lexicon in Russian WordNet and Wiktionaries]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2012. Issue 23. pp. 231–253. Available at: <http://sciepeople.com/publication/113406/> (accessed: 2.04.14). (In Russ.).

11. Henrich V., Hinrichs E., Vodolazova T. Semi-Automatic extension of GermaNet with sense definitions from Wiktionary. In Proceedings of 5th Language & Technology Conference (LTC 2011). Poznan, Poland, 2011 pp. 126-130. Available at: [http://www.sfs.uni-tuebingen.de/ltd/documents/publications/Henrich-et-al-2011\\_GermaNet-Wiktionary-Mapping.pdf](http://www.sfs.uni-tuebingen.de/ltd/documents/publications/Henrich-et-al-2011_GermaNet-Wiktionary-Mapping.pdf) (accessed: 23.02.2014)
12. McCrae J., Montiel-Ponsoda E., Cimiano Ph. Integrating WordNet and Wiktionary with lemon. In Conference Proceedings “Linked Data in Linguistics”, 2012. pp. 25-34.
13. Meyer Ch.M., Gurevych, I. What psycholinguists know about chemistry: Aligning Wiktionary and wordnet for increased domain coverage. In Proceedings of the 5th international joint conference on natural language processing (IJCNLP), Chiang Mai, Thailand. 2011. pp. 883–892.
14. Navigli R., Ponzetto S.P. BabelNet: The automatic construction, evaluation and application of a wide-coverage multilingual semantic network. Artificial Intelligence, 2012. vol 193. pp 217-250.
15. Adomavicius G., Mobasher B., Ricci F., Tuzhilin A. Context-aware recommender systems. AI Magazine. 2011. vol. 32(3), pp. 67-80. Available at: <http://www.ise.bgu.ac.il/faculty/liorr/recsys/bchcontext.pdf> (accessed: 2.04.14).

**Крижановский Андрей Анатольевич** — к-т техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), старший научный сотрудник лаборатории информационных компьютерных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук (ИПМИ КарНЦ РАН). Область научных интересов: автоматическая обработка текста, корпусная лингвистика. Число научных публикаций — 67. [andrew.krizhanovsky@gmail.com](mailto:andrew.krizhanovsky@gmail.com), [code.google.com/p/wikokit/](http://code.google.com/p/wikokit/); ИПМИ КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, 185910, РФ; р.т. +7(8142)76-63-13, факс +7(8142)76-63-13.

**Krizhanovsky Andrew Anatoliyevich** — Ph.D., senior researcher, Computer Aided Integrated Systems Laboratory at St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), senior researcher, Laboratory for Information Computer Technologies of Institute of Applied Mathematical Research of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IAMR). Research Interest: information retrieval, corpus linguistics. The number of scientific publications — 67. [andrew.krizhanovsky@gmail.com](mailto:andrew.krizhanovsky@gmail.com), [code.google.com/p/wikokit/](http://code.google.com/p/wikokit/); IAMR KRC RAS, 11, Pushkinskaya str., Petrozavodsk, Karelia, 185910, Russia; phone +7(8142)76-63-13, fax +7(8142)76-63-13.

**Смирнов Александр Викторович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией интегрированных систем автоматизации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: интеллектуальное управление конфигурациями виртуальных и сетевых организаций, логистика знаний, поддержка принятия решений. Число научных публикаций — 304. [smir@ias.spb.su](mailto:smir@ias.spb.su); СПИИРАН, 14-я линия В. О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-2073, факс +7(812)328-4450.

**Smirnov Alexander Victorovich** — Ph.D., D.Sc., professor, a Head of Computer Aided Integrated Systems Laboratory at St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), a full professor of St.Petersburg State Electrical Engineering University. Research interests: intelligent configuration management of virtual and network organizations, knowledge logistics, decision support. The number of publications — 304. smir@iias.spb.su; SPIIRAS, 39, 14th Line V. O., St. Petersburg, 199178, Russia; tel. +7(812)328-2073, fax: +7(812)328-4450.

**Круглов Василий Михайлович** — д-р филол. наук, проф., ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лингвистических исследований Российской академии наук (ИЛИ РАН), руководитель лаборатории информационных лингвистических технологий. Область научных интересов: русская лексикология и лексикография, компьютерная лингвистика, корпусная лингвистика, электронные картотеки, компьютерная лексикография. Число научных публикаций — 30. vmkruglov@yandex.ru; ИЛИ РАН, Тучков переулок, д. 9, Санкт-Петербург, 199053, РФ; p.т. +7(812)328-1612, факс +7(812)328-4611.

**Kruglov Vasil Mikhailovich** — Ph.D., D.Sc., Prof., leading senior researcher of Institute for Linguistic Studies of the Russian Academy of Sciences (ILI RAS), a head of Information Linguistics Technologies laboratory. Research interests: Russian lexicology and lexicography, computational linguistics, corpus linguistics, electronic library catalogues, computational lexicology. The number of publications — 30. vmkruglov@yandex.ru; ILI RAS, 39, Tuchkov pereulok 9, St. Petersburg, 199053, Russia; tel. +7(812)328-1612, fax: +7(812)328-4611.

**Крижановская Наталья Борисовна** — ведущий инженер-программист лаборатории информационных компьютерных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук (ИПМИ КарНЦ РАН). Область научных интересов: разработка информационных систем для поддержки научных исследований и образования с использованием Интернет-технологий. Число научных публикаций — 29. nataly@krc.karelia.ru, <http://nataly.krc.karelia.ru>; ИПМИ КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, 185910, РФ; p.т. +7(8142)76-63-12, факс +7(8142)76-63-13.

**Krizhanovskaya Natalia Borisovna** — leading programmer, Laboratory for Information Computer Technologies of Institute of Applied Mathematical Research of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IAMR). Research Interest: developing of the information system for scientific research and education using internet-technologies. The number of scientific publications — 29. nataly@krc.karelia.ru, <http://nataly.krc.karelia.ru>; IAMR KRC RAS, 11, Pushkinskaya str., Petrozavodsk, Karelia, 185910, Russia; phone +7(8142)76-63-12, fax +7(8142)76-63-13.

**Кипяткова Ирина Сергеевна** — к-т техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: автоматическое распознавание речи, статистические модели языка. Число научных публикаций — 50.

kipyatkova@iias.spb.su; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-7081, факс +7(812)328-7081.

**Kipyatkova Irina Sergeevna** — Ph.D., senior researcher, Laboratory of Speech and Multimodal Interfaces St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: automatic speech recognition statistical language models. The number of publications — 50. kipyatkova@iias.spb.su; SPIIRAS, 39, 14th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-7081, fax +7(812)328-7081.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-00481, № 12-07-00070, № 12-08-01265, № 13-07-12095, № 14-07-00345), РГНФ (проект № 12-04-12062, № 13-04-12020), проекта № 213 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Интеллектуальные информационные технологии, математическое моделирование, системный анализ и автоматизация», проекта № 2.2 Программы ОНИТ РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация», Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Корпусная лингвистика» 2012-2014, направление 3 «Создание и развитие корпусных ресурсов по языкам народов России» (проект «Корпус вепсского языка: пополнение и развитие электронного ресурса», рук. проекта доктор филол. наук, зав. сектором языкознания ИЯЛИ КарНЦ РАН Зайцева Н.Г.).

**Acknowledgement.** Some parts of the research were carried out under projects funded by grants № 12-01-00481, № 12-07-00070, № 12-08-01265, № 13-07-12095, № 14-07-00345 of the Russian Foundation for Basic Research, grant № 12-04-12062, № 13-04-12020 of the Russian Foundation for Humanities and project of the research program “Intelligent information technologies, mathematical modelling, system analysis and automation” of the Russian Academy of Sciences and project of the research program Corpus Linguistics 2012-2014, direction “Creation and development of body resources on languages of the peoples of Russia”.

## РЕФЕРАТ

*Крижановский А.А., Смирнов А.В., Круглов В.М., Крижановская Н.Б., Кипяткова И.С.* **Автоматическое извлечение словарных помет из Русского Викисловаря.**

В работе рассматривается задача извлечения слабоструктурированных данных из интернет-словарей на примере Русского Викисловаря. Из текстов толкований словарных статей извлекаются словарные пометы — краткие грамматические, стилистические и другие указания на характеристики описываемой лексики. В статье описываются особенности словарных помет в вики-словарях.

Разработана методология извлечения словарных помет из вики-словарей. В соответствие с этой методологией экспертами построено отображение (соответствие один к одному) системы словарных помет Русского Викисловаря (385 помет) и системы словарных помет Английского Викисловаря (1001 помет). Таким образом, построена интегральная система словарных помет (1096 помет), включающая пометы обоих словарей. Особое внимание уделено экспрессивным пометам, приводится «выровненный» список экспрессивных помет Русского Викисловаря и Английского Викисловаря.

Разработан синтаксический анализатор (парсер), который распознаёт и извлекает известные и новые словарные пометы, сокращения и пояснения, указанные в начале текста значений слов в словарных статьях Викисловаря. Следует отметить наличие в парсере большого количества словарных помет известных заранее (385 словарных помет для Русского Викисловаря).

С помощью парсера на основе данных Русского Викисловаря была построена база данных машиночитаемого Викисловаря, включающая информацию о словарных пометах. В работе приводятся численные параметры словарных помет в Русском Викисловаре, а именно: с помощью разработанной программы было подсчитано, что в базе данных машиночитаемого Викисловаря к 133 тыс. значений слов приписаны пометы и пояснения; для полутора тысяч значений слов был указан регион употребления слова, подсчитано число словарных помет для разных предметных областей. Вкладом данной работы в компьютерную лексикографию является оценка численных параметров словарных помет в больших словарях (пятьсот тысяч словарных статей).

## SUMMARY

*Krizhanovsky A.A., Smirnov A.V., Kruglov V.M., Lugovaya N.B., Kipyatkova I.S.* **Automatic extraction of context labels from the Russian Wiktionary.**

The problem of extracting semistructured data from internet dictionaries was considered in the paper. Context labels (grammatical or restricted-usage information) about definitions were extracted from Russian Wiktionary entries. Features of Wiktionary context labels were described in the paper.

The methodology of extracting context labels from wiktionaries was developed. In accordance with this methodology experts constructed a mapping table that establishes a correspondence between Russian Wiktionary context labels (385 labels) and English Wiktionary context labels (1001 labels). As a result the composite system of context labels (1096 labels), which includes both dictionary labels, was constructed. Special attention was paid to expression labels, the aligned list of expression labels of Russian Wiktionary and English Wiktionary was presented.

The parser extracting context labels from the Russian Wiktionary was developed. The parser can recognize and extract new context labels, abbreviations and comments placed before the definition in Wiktionary articles. One outstanding feature of this parser is a large number of context labels which are known in advance (385 context labels for Russian Wiktionary). The parser can recognize and extract new context labels, abbreviations and comments placed before the definition in Wiktionary articles.

The database of machine-readable Russian Wiktionary including context labels was generated by the parser. An evaluation of numerical parameters of context labels in the Russian Wiktionary was performed. With the help of the developed computer program it was found in the Russian Wiktionary that (1) there are 133 000 definitions with context labels and comments, (2) one and a half thousand definitions were supplied with regional labels, (3) it was calculated a number of definitions with labels for each domain knowledge. This paper is an original contribution to computational lexicography, setting out for the first time an analysis of numerical parameters of context labels in the large dictionary (500 000 entries).

И.М. КОБОЗЕВА, Г.О. СИДОРОВ, А.В. ЦИММЕРЛИНГ  
**МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ДИАЛОГОМ В СИСТЕМЕ ОБЩЕНИЯ  
ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ С ПОДВИЖНЫМ РОБОТОМ-ГИДОМ**

---

*Кобозева И.М., Сидоров Г.О., Циммерлинг А.В. Модуль управления диалогом в системе общения пользователя с подвижным роботом-гидом.*

**Аннотация.** Данная работа посвящена описанию диалогового модуля, разработанного для подвижного робота-гида. Модель управления диалогом представлена как сеть переходов системы из одного состояния в другое в зависимости от двух факторов: коммуникативного и визуального. Описываются детали модуля управления диалогом.

**Ключевые слова:** робот-гид, моделирование диалога, управление диалогом, речевые акты.

*Kobozeva I.M., Sidorov G., Zimmerling A. Module for dialog management in the interaction system between user and mobile robotic guide.*

**Abstract.** The paper presents dialogue management module for a mobile robot as a guide. The model of the dialog management is presented as a network of transitions between states depending on two factors: visual and communicative. Details of the dialogue management module are presented.

**Keywords:** mobile robot as a guide, mobile robotic guide, dialog modelling, dialog management, speech acts.

---

**1. Введение.** В настоящей работе мы представляем алгоритмический подход к проблеме моделирования диалога на естественном языке, используя в качестве примера диалог с подвижным роботом-гидом. Необходимо отметить, что в современной компьютерной лингвистике кроме алгоритмического часто применяется и другой подход — основанный на машинном обучении. Скажем, в случае диалога, метод, основанный на машинном обучении, применялся для центральной проблемы его автоматической обработки: обнаружения в нем речевых актов [21].

Заметим, что для многих задач, связанных с компьютерной лингвистикой, таких как определение плагиата, автоматическое построение резюме, определение полярности текста и т.п., методы машинного обучения на основе размеченных корпусов считаются наиболее подходящими [14]. Для применения этих методов строится модель векторного пространства (vector space model). Вообще говоря, модель векторного пространства это стандартный способ вычислять сходство пар любых объектов, в том числе и текстов, представленных как наборы значений признаков (векторы). Признаки являются координатными осями (измерениями) в таком пространстве. Очевидно, что оно может иметь очень много измерений. В качестве меры сходства вычисляется косинус угла между векторами в таком многомерном пространстве:

чем меньше угол между векторами, тем больше похожи соответствующие объекты. Модель была предложена в [12], ее доступное подробное описание можно найти, например, в [14]. Обычно следуют такой схеме обработки данных: выбор задачи — подготовка корпуса — разметка корпуса (обычно вручную, «золотой стандарт») — выбор признаков и их значений (построение векторного пространства) — уменьшение размерности этого пространства (например, с использованием скрытого семантического анализа, *latent semantic analysis* [14]) — выбор одного или нескольких методов машинного обучения (например, *naive Bayes*, *support vector machines*, J48 и др.) и их параметров — применение этих методов — выбор методов для сравнения (*baseline*) — оценка результатов (обычно с перекрестным разбиением на 10 частей для размеченного корпуса, *10-fold cross validation*) — интерпретация результатов. Для построения векторного пространства для текстов обычно в качестве признаков используются *n*-граммы разных типов (включая слова, которые являются 1-граммами). В качестве значений признаков в векторном пространстве традиционно берутся разные варианты меры *tf-idf*.

При использовании этих методов мы дополнительно рекомендуем применение синтаксических *n*-грамм, которые строятся, следуя зависимостям в синтаксическом дереве [16]. Заметим, что синтаксические *n*-граммы, примененные для определенного круга задач, впервые позволяют прямо ввести синтаксическую информацию в чисто статистические методы машинного обучения. Важно помнить, что мы не говорим об автоматическом обучении грамматикам для синтаксического анализа (что достаточно традиционно), а о применении результатов этого анализа — представленных в виде синтаксических *n*-грамм — в других задачах, основанных на модели векторного пространства. То есть, мы отвечаем на вопрос, как принять во внимание структуру синтаксического дерева при определении, скажем, полярности текста.

Тем не менее, не для всякой задачи можно применить подход с машинным обучением, например, для задач определения грамматических значений слов, частеречной принадлежности слов, машинного перевода, распознавания речи. В этих случаях необходимы более традиционные алгоритмические подходы и модели. Скажем, в вышеупомянутой работе [21] не было получено убедительных данных, что машинное обучение позволяет хорошо моделировать диалог. И это притом, что речевые акты явно представляют собой потенциально хороший материал для использования машинного обучения. Проблема состоит в том, что признаки речевых актов имеют семантическую и

прагматическую природу и на данном этапе развития теории обработки текста их очень сложно определять.

Как мы уже упоминали, данная статья основана на алгоритмическом подходе к описанию диалогового модуля для взаимодействия с подвижным роботом-гидом в рамках общего подхода, описанного в работе [15]. Мы описываем систему диалога с роботом Pioneer 3DX, которая включает модуль распознавания речи Dragon NaturallySpeaking и систему синтаксического анализа Freeling [9]. Система разрабатывается для испанского языка, тем не менее лингвистические модули (синтаксический анализ, распознавание речи) работают также и для русского языка. Кроме того, важно заметить, что в то время как набор синтаксических ограничений на порядок слов и перемещения элементов, согласно накопленным типологическим данным [22] лингвоспецифичен, инвентарь элементарных речевых актов и коммуникативных стратегий универсален, то есть, модуль управления диалогом не зависит от языка. Так что в дальнейшем примеры в статье мы приводим на русском языке.

Робот Pioneer 3DX, снабженный точным лазерным датчиком измерения расстояний (до возможных препятствий на его пути), является стандартом де факто для разработки приложений автономных подвижных роботов в реальном мире — его размеры сопоставимы с человеком. Робот движется по предварительно подготовленной карте своего окружения, на которой помечаются специально выделенные объекты или места, например, в данной статье мы считаем помеченным офис администрации (Admin) и лабораторию искусственного интеллекта (IA). В дальнейшем эти названия используются в нашем описании модели диалога, но в каждой реализации этой модели они должны быть заменены на другие существенные объекты в специфическом окружении. Робот очень надежно перемещается в таком пространстве, в котором могут появляться новые для него (отсутствующие на карте) объекты, которые он легко объезжает. Робот знает, когда каждый объект становится видимым человеку — это происходит, если между ними нет препятствия, и расстояние стало достаточно небольшим: мы предлагаем рассматривать порог до 3 метров. В нашей модели, когда какой-либо объект  $X$  попадает в «поле зрения» (напомним, что не камеры, а датчика), это отражается как элемент  $visual\_act(X)$ .

Лингвистическое обеспечение естественного диалога человека с подвижным роботом является одним из самых трудных вариантов уже давно поставленной общей задачи лингвистического обеспечения диалога на естественном языке (ЕЯ) в человеко-машинных системах, см. обзор [24]. Трудность связана с мультимодальностью информации,

которую робот должен «понимать», с принципиальными различиями между языками репрезентации пространства в «сознании» робота и в сознании человека, не говоря уже об общей для всех систем человеко-машинного общения проблеме понимания ЕЯ на уровне, позволяющем разрешать референцию и правильно интерпретировать интенции собеседника [10,11,13].

Развернувшиеся в последние двадцать лет работы по моделированию общения человека с подвижным роботом, как правило, носят исследовательский характер и углубленно анализируют тот или иной аспект комплексной проблемы, например, влияние способности робота жестикулировать на успешность коммуникации, важность направления взгляда и ситуационных знаний для эффективного взаимодействия [6, 25]. С другой стороны, имеются и разработки действующих подвижных роботов, способных выполнять те или иные функции и вести диалог с пользователем на приемлемом уровне естественности и надежности, напр., [1, 2, 7, 17, 19].

**2. Функции мобильного робота.** Среди функций робота, для поддержания которых разрабатываются диалоговые модули, можно назвать следующие:

1) функция проводника (например, гида в музее или на выставке; пример — робот-гид Robobox (подробное описание представлено на сайте <http://lis2.epfl.ch/resources/podcast/2008/01/roland-siegwart-autonomous-robots.html>), созданный Р. Зигвартом (Roland Siegwart), работавший на швейцарской национальной выставке Expo02);

2) функция ученика, которого обучают понимать свое окружение (см. [4, 5, 20]);

3) функция транспортера, как, например, у инвалидной коляски, которой пользователь управляет при помощи голосовых команд;

4) функция посыльного, движущегося к какой-либо цели самостоятельно или по командам, исходящим от пользователя:

i. в ситуации, когда робот «знает» путь;

ii. в ситуации, когда он не знает пути и, чтобы пройти по нему, должен общаться с пользователем в удаленном доступе [2];

5) функция репортера, который сообщает, что он в данный момент воспринимает;

6) функция официанта в ресторане;

7) функция помощника при выборе объектов, например, в магазине при покупке;

8) функция манипулятора, который выполняет команды пользователя по перемещению объектов (например, самый первый робот Т. Винограда SHRDLU).

Разумеется, робот может быть предназначен для нескольких функций. Часто сочетаются функции посыльного с функцией манипулятора: робот должен по команде пользователя переместиться в нужное место и произвести то или иное действие с указанным объектом. Функции ученика и репортера могут сочетаться и между собой и с функцией посыльного, как в [18], где моделируется диалог для робота, способного перемещаться по команде пользователя, рапортовать о том, что он воспринимает, и научиться от пользователя именам воспринимаемых объектов.

Каждая функция предъявляет определенные требования к структуре диалога и репертуару коммуникативных актов (реплик и/или невербальных реакций). Так, в зависимости от функций, инициатором и контролером хода диалога выступает либо пользователь, либо робот, либо инициатива и контроль могут переходить от робота к пользователю по мере развития диалога. В функции гида робот выступает инициатором и контролером хода диалога, а в остальных случаях диалог инициируется и контролируется пользователем или обоими коммуникантами попеременно. Чем больше функций у робота, тем шире репертуар коммуникативных актов, которые он должен порождать и понимать, тем важнее наличие в архитектуре системы концептуального и интенционального модуля (энциклопедической информации и модели рационального поведения).

В нашем случае диалоговый модуль разрабатывается для системы, не имеющей такого модуля «обширных знаний», и поэтому в качестве моделируемой функции избирается сравнительно простая функция робота-гида, предполагающая контроль за ходом диалога со стороны робота и сужение благодаря этому репертуара необходимых коммуникативных актов (КА).

**3. Специфика диалога «гид–посетитель».** Под гидом в данном случае понимается не только представитель определенной профессии, а любой агент, который в определенной ситуации решает задачу ознакомления посетителей с тем или иным местом, в которое они прибыли, чтобы узнать о нем больше, чем они знали ранее, и/или с теми объектами, которые находятся в этом месте. Таким местом может быть та или иная местность (напр., заповедник), населенный пункт (напр., город), чье-то владение (напр., усадьба помещика) или интерьер какого-то здания или его части (напр., музей, школа, этаж большого учреждения, квартира), а гидом может быть хозяин дома, риэлтор, сотрудник научного учреждения, местный житель, и вообще любой человек, взявшийся выполнить указанную социальную функцию. В любом случае исполнение функции гида начинается с того момента, как агент

принимает на себя эту роль, что в свою очередь предполагает заранее установленным, что собеседник выступает в роли «посетителя незнакомого места» и имеет соответствующее этой роли намерение. В случае с роботом ответственность за уместность принятия им на себя роли гида может лежать на человеке, который запускает (triggers) процесс в нужный момент, то есть, человек может, например, вызвать соответствующую программу и робот начнет исполнять свою роль.

Общая задача гида — ознакомить посетителей с местом, — разбивается на ряд подзадач, каждая из которых состоит в том, чтобы подвести их к объекту (в широком смысле), представляющему для них интерес и, возможно, сообщить тот или иной объем сведений об этом объекте. В ходе решения каждой из подзадач гид может дополнительно обращать внимание на встречающиеся по пути к очередной цели «второстепенные» объекты, например, ведя путников по лесу к озеру, которое они хотели увидеть, отметить встретившуюся по дороге поляну, на которой можно расположиться на отдых.

В свою очередь, решение каждой подзадачи предполагает совершение коммуникативных (вербальных и/или невербальных) актов и актов перемещения к заранее намеченному объекту интереса по обычно заранее известному для гида пути.

**4. Речевые акты и речевые блоки в диалоге робота-гида с посетителем.** В нашем случае модель диалога разрабатывается для робота-гида, проводящего посетителей по одному из этажей института. Для этой конкретной ситуации в репертуар действий робота включается три вида актов — речевые акты, речевые блоки и мультимедальные блоки.

1) *Речевые акты* мы понимаем стандартным для теории речевых актов способом — как акты произнесения языкового выражения, обычно равного отдельному простому предложению, имеющего определенную иллокутивную силу, т.е. выражающего (прямо или косвенно) цель говорящего наряду с рядом других прагматических компонентов смысла [13].

Набор речевых актов робота, релевантных для данной ситуации, включает в себя:

- вопрос о принятии предложения о туре (Tour-Question),
- предложение выбрать первый объект осмотра из набора альтернатив, в нашем случае, офис администрации (Admin) и лабораторию ИИ (AI) (Question\_Altern(Adm, AI)),
- завершение диалога в случае отказа от предложения (Closure).

Каждому речевому акту соответствует набор реплик, которые варьируются, чтобы избежать повторения одной и той же фразы. Примеры реплик приводятся ниже.

2) *Речевые блоки* мы понимаем как сложные речевые акты, состоящие из последовательности речевых актов (РА) одного говорящего, связанные между собой единством общего речевого замысла в одно целое и предполагающих реакцию адресата на это целое, а не на отдельные составляющие его РА.

В нашем случае используется три вида речевых блоков: (а) Пограничные блоки (BB, от Borderline Blocks), (b) Нарративные блоки (NB от Narrative blocks) и (c) Второстепенные блоки (SB от Secondary Blocks).

2а) *Пограничные блоки* включают Вводный блок (IB от Introductory Block) и Терминальный блок (TB от Terminal Block). Каждый блок состоит из последовательности элементарных речевых актов (РА).

*Вводный блок* (IB) — это последовательность вида (в заданном порядке):

Приветствие (Greeting) + Представление себя (Introduction) + Предложение осмотра помещения (Tour-Proposal).

Этот блок запускается в исходной фазе, которая принадлежит типу фаз говорения (о типах фаз см. ниже).

*Терминальный блок* (TB) — это последовательность вида:

Объявление о конце осмотра (Announce\_End) + Этикетная самооценка (Evaluation) + Прощание (Farewell).

Этот блок запускается в конечной фазе, которая определяется с опорой на историю диалога. Ниже в формальной репрезентации диалога переход в фазу произнесения терминального блока обусловлен контекстным ограничением вида «NB(X)»  $\in$  HD, где HD — протокол данного диалога (history of the dialogue), а X принимает одно из двух значений — Adm или AI, т.е. отслеживается тот факт, что оба объекта осмотра уже пройдены.

2b) *Нарративные блоки* (NB) представляют собой тексты или презентации, содержащие определенный объем информации об объектах показа (в нашем случае — о лаборатории ИИ и офисе администрации). Нарративные блоки запускаются по достижении роботом объекта показа, точнее, после того, как робот завершит мультимодальный блок типа ММВ2 (см. ниже). В нарративный блок можно заранее добавлять нужную информацию.

2c) *Второстепенный блок* (SB от Secondary block) произносится роботом в ситуации, связанной с возможностью в ходе осмотра поме-

щения воспользоваться удобствами (туалет и кулер), и идет в связке с второстепенным мультимодальным блоком SMB (см. ниже).

Второстепенный блок — это отвлечение от основной цели: заявление о намерении подождать, пока пользователь воспользуется удобством (Promise\_Wait) + просьба пользователю сообщить о своем возвращении (Request\_Return).

Этот блок запускается положительным ответом пользователя на предложение воспользоваться удобством.

3) *Мультимодальные блоки* — это последовательности речевых актов (РА) и неречевых действий, совершаемых в фиксированном порядке. Они делятся на основные и второстепенные.

3а) *Основные мультимодальные блоки* (MMB от Main Multimodal Blocks). В системе представлены два вида MMB:

MMB1: просьба (команда) двигаться вслед за роботом, которую тот произносит (Imper\_Move) + движение робота к цели (Move(X)), где  $X \in \{Adm, AI\}$ .

Заметим, что мы предполагаем, что пользователь будет следовать за роботом, то есть выполнять команду (Imper\_Move), поскольку он согласился на осмотр. При необходимости проверять, что пользователь все еще следует за роботом, можно ввести в нашу модель дополнительное подтверждение: робот может спрашивать о подтверждении продолжения осмотра каждые 5-10 минут, и в случае отсутствия ответа или отрицательного ответа прекращать тур.

Предполагается, что робот-гид всегда начинает тур с фиксированной исходной точки L (в нашем конкретном приложении — от входа на этаж с лестницы) и движется к первой принятой цели кратчайшим путем, а ко второй цели — по маршруту, предполагающему прохождение точки L, при этом, напомним, робот способен обходить препятствия, которых нет на его карте.

Первый в ходе диалога блок данного иллокутивного типа запускается ответом пользователя на речевой акт (РА) робота типа Question\_Altern(Adm, AI) (см. выше). Второй блок данного типа запускается отрицательным ответом пользователя на вопрос робота о желании воспользоваться некоторым удобством и произносится по завершении первого нарративного блока.

MMB2: остановка робота у цели (Stop\_X) + команда остановиться (Imper\_Stop). Этот блок запускается визуальным актом, представляемым в модели как visual\_act(X), где  $X \in \{Adm, AI\}$ .

3б) *Второстепенные мультимодальные блоки* (SMB от Secondary Multimodal Blocks) — это последовательность действий, связанная с второстепенными объектами на пути (в нашем случае это

удобства: туалет и кулер, репрезентируемые в модели как WC и Cooler соответственно).

SMB: остановка около второстепенного объекта (Stop(X)) + привлечение внимания к второстепенному объекту Announce\_Utility(X) + вопрос о желании воспользоваться удобством X, Question\_Utility(X), где  $X \in \{\text{Cooler, WC}\}$ . SMB, как и MMB2 запускается визуальным актом, представляемым в модели как visual\_act(X), где  $X \in \{\text{Cooler, WC}\}$ , то есть робот «видит» данный объект, отмеченный на карте, и находится достаточно близко от него.

Таким образом, среди действий робота есть как иллокутивно-независимые, так и иллокутивно-зависимые в смысле Баранова и Крейдлина (1992) [23]. К иллокутивно-независимым, т.е. запускаемым по «инициативе» робота, относятся речевые блоки типа BB, NB, мультимодальные блоки MMB2 (Stop(X) + Imper\_Stop) и SMB. К иллокутивно-зависимым, т.е. запускаемым при условии реализации пользователем того или иного речевого акта (РА), относятся речевой блок SB и речевые акты Question\_Altern и Ask\_Confirm, а также MMB1 (Imper\_Move + Move(X)).

Каждому иллокутивному типу речевого акта или речевого блока, а также речевого компонента из мультимодального блока в модуле синтеза текста ставится в соответствие набор речевых шаблонов (реплик), из которых робот делает выбор, запоминая, какой вариант уже был выбран с тем, чтобы в следующую итерацию выбрать другой шаблон того же типа и запомнить его и т.д. Это делает поведение робота более естественным. Для примера приведем возможные реализации некоторых из выше охарактеризованных типов по-русски:

– Тип “Приветствие (Greeting)”: *Здравствуйте; Привет; Приветствую Вас в нашем институте; Добро пожаловать* и т.д.

– Тип “Предложение осмотра помещения (Tour-Proposal)”: *Я могу провести экскурсию по этажу; Я могу показать Вам отделы, которые находятся здесь, и рассказать о них; Я подведу Вас к отделам института, находящимся на этом этаже* и т.п.

– Тип “Этикетная самооценка (Evaluation)”: *Надеюсь, я справился со своей задачей; Надеюсь, Вам не было скучно со мной; Я очень старался, чтобы Вам было интересно* и пр.

– Тип “Заявление о намерении подождать (Promise\_Wait)”: *Я подожду Вас здесь; Жду Вас здесь; Я буду ждать Вас; Я подожду Вашего возвращения* и т.п.

– Тип “Команда двигаться вслед (Imper\_Move)”: *Следуйте за мной!; Пойдемте!; Вперед! В путь, друзья мои!* и т.п.

– Тип “Вопрос о принятии предложения о туре (Tour-Question)”: *Хотите?; Вам это интересно?; Вы принимаете мое предложение? И т.п.*

– Тип “Предложение выбрать первый объект осмотра из набора альтернатив (Question\_Altern(Adm, AI))”: *С чего начнем — с офиса администрации или с лаборатории искусственного интеллекта?; Куда направимся сначала — к офису администрации или к лаборатории искусственного интеллекта?*

– Тип “Завершение диалога в случае отказа от предложения (Closure)”: *Ну что ж, в таком случае до свидания; Тогда до свидания; Извините за беспокойство и до новых встреч!* и т.п.

Каждый иллокутивно-независимый речевой акт и речевой блок робота в моделируемом типе диалога налагает определенное коммуникативное обязательство (commitment) на адресата при условии, что он в целом соблюдает аксиомы коммуникации Грайса [3], т.е. принимает общую цель и направление развития диалога, не пытается намеренно вводить адресата (робота) в заблуждение и т.д. Все речевые акты пользователя в данном типе диалога являются иллокутивно-зависимыми: в силу указанных выше ограничений не предполагается возможности для пользователя проявить инициативу в диалоге, например, задать роботу какой-либо вопрос, даже касающийся осматриваемого места. Пользователь должен реагировать в соответствии с иллокутивной целью речевых действий робота, а если он позволяет себе «вольности», то робот будет трактовать их как ошибку и пытаться «добиться» реакции требуемого типа (см. ниже). В дальнейшем планируется снять это ограничение с диалога.

**5. Речевые акты пользователя.** При вышеуказанных ограничениях репертуар речевых актов ожидаемых от пользователя, сводится к следующим РА, в сокращенных названиях которых присутствует префикс uSA (user Speech Act):

– Согласие uSA(Yes) или Отказ uSA(No) как реакции на предложение осмотра, входящее в блок IB и предложение воспользоваться второстепенным объектом, входящее в блок SB1.

– Ответ с выбранной альтернативой на вопрос робота, с какого объекта начать осмотр (см. выше Question\_Altern(X), где  $X \in \{Adm, AI\}$ , в нашем конкретном случае):

– выбор офиса администрации uSA(Adm),

– выбор лаборатории искусственного интеллекта uSA(AI).

– Сообщение о возвращении на место после отлучки к второстепенному объекту uSA(Ready).

– Любой непредусмотренный системой в данном типе диалога РА пользователя трактуется как ошибка: Непредусмотренный (неинтерпретабельный) речевой акт пользователя uSA(Error).

Если система не может подвести очередной речевой акт пользователя ни под один из пяти возможных иллокутивных типов, то робот возвращается в фазу, непосредственно предшествовавшую появлению речевого акта, распознанному как uSA(Error), и повторяет тот речевой акт, после которого пользователь выдал речевой акт uSA(Error).

Если в отношении иллокутивного типа высказывания пользователь ограничен рамками коммуникативных обязательств, налагаемых на него речевыми актами робота, то в отношении способа оформления речевых актов разрешенного типа он относительно свободен. Анализатор речи опознает единицы, маркированные в словаре системы по пропозициональному содержанию или иллокутивной функции. Модуль управления диалогом припишет реплике пользователя в данной точке диалога тот иллокутивный тип из набора возможных, который соответствует маркеру распознанных единиц. Так, лексемы *офис* и *администрация* в реплике, поданной пользователем в ответ на речевой акт робота типа «Предложение выбрать первый объект осмотра из набора альтернатив Question\_Altern(Adm, AI)» будет маркером иллокутивного типа «Выбор офиса администрации uSA(Adm)». В будущем можно реализовывать и более сложный анализ, потому что синтаксический анализатор позволяет работать с деревом разбора каждой фразы диалога.

**6. Модель диалога.** Модель диалога можно представить как сеть переходов робота из одного диалогического состояния в другое в зависимости от полученной им речевой или визуальной информации, истории диалога и намерений пользователя. Мы представляем эти состояния как правила, другая возможность состоит в построении конечного автомата [11].

В нашей модели диалогические состояния бывают следующих типов:

- состояние говорения (talk, talking state),
- состояние восприятия (perc., perception state),
- состояние движения (move, moving state),
- конечное состояние (final, final state).

Переход из одной фазы в другую осуществляется при помощи совершения роботом тех или иных действий (речевых и/или двигательных). Эти действия производятся в качестве реакции на речевой акт пользователя uSA(X), где X принимает значение из набора «пользовательских» иллокутивных типов РА, или визуальный акт воспри-

ятия роботом некоторого объекта  $Y$ ,  $visual\_act(Y)$ , где  $Y$  принимает значение из набора объектов, отмеченных на внутренней карте робота.

Соответственно, действие робота в зависимости от его текущего состояния задается парой «(входной речевой акт пользователя или визуальный акт) → выходной акт робота».

Таким образом, модель диалога может быть представлена в виде набора фаз и действий, переводящих диалог из одной фазы в другую. Можно использовать рекурсию, то есть вызывать одну и ту же функцию внутри самой себя, но во избежание заикливания возможная глубина рекурсии должна быть ограничена.

Далее мы приводим список правил, которые описывают нашу модель. Правила имеют вид:

*состояние робота & «условие (если выполняется) : действие (то сделай)» → новое состояние робота*

То есть, чтобы применить правило, робот должен быть в данном состоянии и должно выполниться условие. В этом случае робот будет выполнять соответствующее действие и перейдет в новое состояние. После каждого применения правила добавляются в историю данного диалога HD (history of dialogue). Иногда условие может отсутствовать: это значит, что условие истинно, то есть действие должно выполняться во всех случаях. Иногда не требуется действие, то есть нет необходимости, чтобы робот что-либо делал. Эти случаи обозначаются символом  $\emptyset$ . Заметим, что после применения правила, робот всегда переходит в новое состояние. Примеры правил приведены ниже:

talk <sub>1</sub>	&	$\emptyset$ : IB	→ talk <sub>2</sub>
talk <sub>2</sub>	&	$\emptyset$ : Tour-Question	→ perc <sub>1</sub>
perc <sub>1</sub>	&	uSA(Yes) : Question_Altern(Adm, AI)	→ perc <sub>2</sub>
perc <sub>1</sub>	&	uSA(No) : Closure	→ final
perc <sub>1</sub>	&	uSA(Error) : $\emptyset$	→ talk <sub>2</sub>
perc <sub>2</sub>	&	uSA(Adm) : MMB1(Adm)	→ move <sub>1</sub>
perc <sub>2</sub>	&	uSA(AI) : MMB1(AI)	→ move <sub>2</sub>
perc <sub>2</sub>	&	uSA(Error) : $\emptyset$	→ talk <sub>3</sub>
talk <sub>3</sub>	&	$\emptyset$ : Question_Altern(Adm, AI)	→ perc <sub>2</sub>
move <sub>1</sub>	&	visual_act(Adm) : MMB2(Adm)	→ talk <sub>4</sub>
move <sub>1</sub>	&	visual_act(Cooler) : SMB(Cooler)	→ perc <sub>3</sub>
perc <sub>3</sub>	&	uSA(Yes) : SB	→ perc <sub>4</sub>
perc <sub>3</sub>	&	uSA(No) : MMB1(Adm)	→ move <sub>1</sub>

perc <sub>4</sub>	&	uSA(Ready) : MMB1(Adm)	→	move <sub>1</sub>
talk <sub>4</sub>	&	∅ : NB(Adm)	→	talk <sub>5</sub>
talk <sub>5</sub>	&	NB(AI) ∉ HD: MMB1(AI)	→	move <sub>2</sub>
talk <sub>5</sub>	&	NB(AI) ∈ HD:TB	→	final
move <sub>2</sub>	&	visual_act(AI) : MMB2(AI)	→	talk <sub>6</sub>
move <sub>2</sub>	&	visual_act(WC) : SMB(WC)	→	perc <sub>5</sub>
perc <sub>5</sub>	&	uSA(Yes) : SB	→	perc <sub>6</sub>
perc <sub>5</sub>	&	uSA(No) : MMB1(AI)	→	move <sub>2</sub>
perc <sub>6</sub>	&	uSA(Ready) : MMB1(AI)	→	move <sub>2</sub>
talk <sub>6</sub>	&	∅ : NB(AI)	→	talk <sub>7</sub>
talk <sub>7</sub>	&	NB(Adm) ∉ HD : MMB1(Adm)	→	talk <sub>7</sub>
talk <sub>7</sub>	&	NB(Adm) ∈ HD:TB	→	final

Первые два правила интерпретируются так: находясь в исходной фазе говорения робот совершает два инициативных, т.е. не вызванных внешними причинами, речевых действия, произнося сначала «Вводный блок (IB)», а затем вопрос о желании совершить тур Tour-Question, после чего переходит в фазу восприятия (входной информации) perc<sub>1</sub>.

**7. Примеры диалогов.** Приведем пример диалога, соответствующего данной модели. *P* это робот, *П* — пользователь, после каждой реплики приводится ее описание в терминах предлагаемой модели. Заметим, что одно и то же правило в этих примерах может начинаться до реплики или продолжаться после реплики, что показано многоточием и открывающими и закрывающими кавычками на разных строках.

*P: Здравствуйте. Я робот-гид. Я могу провести для Вас экскурсию по этажу. Хотите?*

talk<sub>1</sub> & «∅ : IB» → talk<sub>2</sub>;

talk<sub>2</sub> & «∅ : Tour-Question» → perc<sub>1</sub>

*П: Да, спасибо.*

perc<sub>1</sub> & «uSA(Yes)...

*P: С какого отдела начнем — с офиса администрации или с лаборатории искусственного интеллекта?*

... : Question\_Altern(Adm, AI)» → perc<sub>2</sub>

*П: Конечно, с лаборатории.*

perc<sub>2</sub> & «uSA(AI)...

*P: Следуйте за мной!*

... : MMB1(AI)» → move<sub>2</sub>

Двигаются в сторону лаборатории. Поравнявшись с туалетом, робот останавливается и произносит:

*P: Вот здесь у нас туалет. Не желаете воспользоваться?*

$move_2 \& \langle \text{visual\_act(WC) : SMB(WC)} \rangle \rightarrow perc_5$

*П: Спасибо, нет.*

$perc_5 \& \langle uSA(No) \dots$

*P: Пойдем.*

$\dots : MMB1(AI) \rangle \rightarrow move_2$

Двигаются далее в сторону лаборатории. Дойдя до цели робот останавливается и произносит:

*P: Мы у цели.*

$move_2 \& \langle \text{visual\_act(AI) : MMB2(AI)} \rangle \rightarrow talk_6$

Робот начинает рассказ или показывает презентацию о лаборатории. Закончив и поменяв свое состояние ( $talk_6 \rightarrow talk_7$ ), он произносит:

*P: Следуйте за мной!*

$talk_7 \& \langle \emptyset : MMB1(Adm) \rangle \rightarrow move_1$

На пути ко второму объекту показа — офису, поравнявшись с кулером с питьевой водой робот останавливается и произносит:

*P: Обратите внимание на кулер. Хотите выпить воды?*

$move_1 \& \langle \text{visual\_act(Cooler) : SMB(Cooler)} \rangle \rightarrow perc_3$

*П: Хорошо бы.*

$perc_3 \& \langle uSA(Yes) \dots$

*P: Жду вас здесь. Когда вернетесь, скажите мне об этом.*

$\dots : SB \rangle \rightarrow perc_4$

Пользователь отходит к кулеру, пьет воду, возвращается и произносит:

*П: Я вернулся. Я готов.*

$perc_4 \& \langle uSA(Ready) \dots$

*P: Пойдемте.*

$\dots : MMB1(Adm) \rangle \rightarrow move_1$

Двигаются в сторону офиса. Дойдя до него, робот останавливается и произносит:

*P: Вот и офис.*

$move_1 \& \langle \text{visual\_act(Adm) : MMB2(Adm)} \rangle \rightarrow talk_4$

После этого идет рассказ или презентация о деятельности администрации. Завершив нарративный блок и поменяв свое состояние ( $talk_4 \rightarrow talk_5$ ), робот произносит:

*P: Тур по этажу окончен. Надеюсь, я не слишком Вас утомил. До свидания.*

$talk_5 \& \langle \emptyset : TB \rangle \rightarrow final$

Приведем для иллюстрации еще один фрагмента диалога:

...

*P: Какой отдел посетим в первую очередь — офис администрации или лабораторию искусственного интеллекта?*

[perc<sub>1</sub> & «uSA(Yes) :] Question\_Altern(Adm, AI)» → perc<sub>2</sub>

*П: Не знаю.*

perc<sub>2</sub> & «uSA(Error) : Ø» → talk<sub>3</sub>

*P: С чего начнем: с офиса администрации или лаборатории искусственного интеллекта?*

talk<sub>3</sub> & «Ø : Question\_Altern(Adm, AI)» → perc<sub>2</sub>

*П: Ну, давайте с офиса.*

perc<sub>2</sub> & «uSA(Adm)...

...

Заметно, что реплики робота не во всех точках диалога звучат естественно. Чтобы сделать их более естественными, предстоит усовершенствовать модель диалога, например, перейдя от пропозициональной модели к предикатной, т.е. учесть не только иллюкутивную семантику базовых речевых актов, но и предикатно-аргументную структуру реплик, а также разработать шаблоны межфразовых связей.

**8. Заключение.** В данной статье мы представили описание модуля управления диалогом при общении с подвижным роботом, выполняющим функции гида. Модуль включает в себя модель диалога, описание речевых актов и речевых блоков, из которых можно строить каждый компонент модели, и готовые шаблоны реплик, соответствующих всем речевым актам, имеющимся в модели. Вся модель за исключением шаблонов является независимой от языка.

Хотя в статье мы описали только ограниченное применение модели, предложенная модель по своей архитектуре универсальна и предоставляет средства для формального моделирования диалога с автономным подвижным роботом на разном языковом материале, поскольку инвентарь речевых актов и коммуникативных стратегий говорящего в отличие от лингвоспецифических ограничений на синтаксическую структуру является общим для всех естественных языков.

## Литература

1. Dialog with Robots // AAAI 2010. Fall Symposium. November 2010, Arlington VA. URL: [http://hci.cs.wisc.edu/aaai10/?page\\_id=169](http://hci.cs.wisc.edu/aaai10/?page_id=169).
2. Green S.A., Billinghurst M., Chen X. Q., Chase G.J. Human-Robot Collaboration: A Literature Review and Augmented Reality Approach in Design // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2007. vol. 5. pp. 1–18.
3. Grice P. Logic and conversation // Syntax and Semantics, 3: Speech Acts, ed. P. Cole & J. Morgan, New York: Academic Press. 1975. (Reprinted in: Studies in the Way of Words, ed. H. P. Grice, Cambridge, MA: Harvard University Press. 1989. pp. 22–40).

4. *Kruijff G.J.M., Zender H., Jensfelt P., Christensen H.I.* Clarification dialogues in human-augmented mapping // Human Robot Interaction'06, Salt Lake City, Utah, USA, 2006.
5. *Kruijff G.J.M., Lison P., Benjamin T., Jacobsson H., Zender H., Kruijff-Korbayova I., Hawes N.* Situated dialogue processing for human-robot interaction // Cognitive Systems. 2010. pp. 311–364.
6. *Kuzuoka H., Yamazaki K., Yamazaki A., Kosaka J., Suga Y., Heath C.* Dual ecologies of robot as communication media: Thoughts on coordinating orientations and projectability // CHI'04 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2004. pp 183–190.
7. *Lemaignan S., Ros R., Alami R.* Dialogue in situated environments: A symbolic approach to perspective-aware grounding, clarification and reasoning for robot // Proc. Robotics, Science and Systems, Grounding Human-Robot Dialog for Spatial Tasks workshop, 2011.
8. *Marge M., Pappu A., Frisch B., Harris Th.K., Rudnicky A.* Exploring Spoken Dialog Interaction in Human-Robot Teams // Proceedings of Robots, Games, and Research: Success stories in USA, RSim IROS Workshop, St. Louis, MO, USA, 2009.
9. *Padró L., Collado M., Reese S., Lloberes M., Castellón I.* FreeLing 2.1: Five Years of Open-Source Language Processing Tools // Proceedings of 7th Language Resources and Evaluation Conference (LREC 2010), ELRA, La Valletta, Malta, 2010.
10. *Pakray P., Barman U., Bandyopadhyay S., Gelbukh A.* A Statistics-Based Semantic Textual Entailment System // MICAI 2011, Lecture Notes in Artificial Intelligence 7094, Springer, 2011, pp. 267–276.
11. *Pineda L.A., Estrada V.M., Coria S.R., Allen J.F.* The obligations and common ground structure of practical dialogues // *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*. 2007. vol. 11(36). pp. 9–17.
12. *Salton G., Wong A., Yang C.S.* A vector space model for automatic indexing // *Communications of the ACM*. 1975. vol. 18(11). pp. 613–620.
13. *Searle J.* Indirect speech acts // *Syntax and Semantics*, 3: Speech Acts, ed. P. Cole & J. L. Morgan, New York: Academic Press. 1975. pp. 59–82. (Reprinted in: *Pragmatics: A Reader*, ed. S. Davis, Oxford: Oxford University Press, 1991. pp. 265–277).
14. *Sidorov G.* Non-linear construction of n-grams in computational linguistics: syntactic, filtered, and generalized n-grams // *Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial*. 2013. 166 p.
15. *Sidorov G.* Development of an application for dialog in natural language with a mobile robot [Desarrollo de una aplicación para el diálogo en lenguaje natural con un robot móvil (in Spanish)] // *Research in computing science*. 2013. vol. 62. pp. 95–108.
16. *Sidorov G., Velasquez F., Stamatatos E., Gelbukh A., Chanona-Hernández L.* Syntactic N-grams as Machine Learning Features for Natural Language Processing // *Expert Systems with Applications*. 2014. vol. 41(3). pp. 853–860.
17. *Sisbot E.A., Ros R., Alami R.* Situation assessment for human-robot interaction // Proc. of 20th IEEE International Symposium in Robot and Human Interactive Communication. 2011.
18. *Skubic M., Perzanowski D., Schultz A., Adams W.* Using Spatial Language in a Human-Robot Dialog // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, D.C., 2002.
19. *Svanaes D., Seland G.* Putting the users center stage: role playing and low-fi prototyping enable end users to design mobile systems // *Proceedings CHI 2004*, Vienna, Austria, Association for Computing Machinery. 2004. pp. 479-486.
20. *Topp E.A., Huttenrauch H., Christensen H.I., Severinson E. K.* Bringing Together Human and Robotic Environment Representations—A Pilot Study // *Proceedings of the IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Beijing, China. 2006.

21. *Wilks Y., Webb N., Setzer A., Hepple M., Catizone R.* Machine learning approaches to human dialogue modelling // J.C.J. van Kuppevelt et al. (eds.), *Advances in Natural Multimodal Dialogue Systems*. 2005. pp. 355–370.
22. *Аркадьев П.М., Сердобольская Н.В., Циммерлинг А.В.* Проект типологической базы по синтаксическим ограничениям на передвижения // *Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии, по материалам международной конференции «Диалог 2010»*. М.: РГГУ. 2010. Вып. 9(16). С. 437–441.
23. *Баранов А.Н., Крейдлин Г.Е.* Иллокутивное вынуждение в структуре диалога // *Вопросы языкознания*. 1992. №2. С. 84–99.
24. *Кобозева И.М., Лауфер Н.И., Сабурова И.Г.* Моделирование общения в человеко-машинных системах // *Лингвистическое обеспечение информационных систем*. М.: Изд-во ИНИОН АН СССР, 1987.
25. *Прищепа М.В.* Разработка профиля пользователя с учетом психологических аспектов взаимодействия человека с информационным мобильным роботом // *Труды СПИИРАН*. 2012. Вып. 2(21). С. 56–70.

## References

1. *Dialog with Robots*. AAAI 2010. Fall Symposium. November 2010, Arlington VA. Available at: [http://hci.cs.wisc.edu/aaai10/?page\\_id=169](http://hci.cs.wisc.edu/aaai10/?page_id=169).
2. Green S.A., Billinghurst M., Chen X. Q., Chase G.J. *Human-Robot Collaboration: A Literature Review and Augmented Reality Approach in Design*. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2007. vol. 5. pp. 1–18.
3. Grice P. *Logic and conversation. Syntax and Semantics, 3: Speech Acts*, ed. P. Cole & J. Morgan, New York: Academic Press. 1975 (Reprinted in: *Studies in the Way of Words*, ed. H. P. Grice, Cambridge, MA: Harvard University Press. 1989. pp. 22–40).
4. Kruijff G.J.M., Zender H., Jensfelt P., Christensen H.I. *Clarification dialogues in human-augmented mapping*. *Human Robot Interaction'06*, Salt Lake City, Utah, USA, 2006.
5. Kruijff G.J.M., Lison P., Benjamin T., Jacobsson H., Zender H., Kruijff-Korbayova I., Hawes N. *Situated dialogue processing for human-robot interaction*. *Cognitive Systems*. 2010. pp. 311–364.
6. Kuzuoka H., Yamazaki K., Yamazaki A., Kosaka J., Suga Y., Heath C. *Dual ecologies of robot as communication media: Thoughts on coordinating orientations and projectability*. *CHI'04 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2004, pp 183–190.
7. Lemaignan S., Ros R., Alami R. *Dialogue in situated environments: A symbolic approach to perspective-aware grounding, clarification and reasoning for robot*. *Proc. Robotics, Science and Systems, Grounding Human-Robot Dialog for Spatial Tasks workshop*, 2011.
8. Marge M., Pappu A., Frisch B., Harris Th.K., Rudnický A. *Exploring Spoken Dialog Interaction in Human-Robot Teams*. *Proceedings of Robots, Games, and Research: Success stories in USA, RSim IROS Workshop*, St. Louis, MO, USA. 2009.
9. Padró L., Collado M., Reese S., Lloberes M., Castellón I. *FreeLing 2.1: Five Years of Open-Source Language Processing Tools*. *Proceedings of 7th Language Resources and Evaluation Conference (LREC 2010)*, ELRA, La Valletta, Malta, 2010.
10. Pakray P., Barman U., Bandyopadhyay S., Gelbukh A. *A Statistics-Based Semantic Textual Entailment System*. *MICAI 2011, Lecture Notes in Artificial Intelligence 7094*, Springer. 2011. pp. 267–276.
11. Pineda L.A., Estrada V.M., Coria S.R., Allen J.F. *The obligations and common ground structure of practical dialogues*. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*. 2007. vol. 11(36). pp. 9–17.
12. Salton G., Wong A., Yang C.S. *A vector space model for automatic indexing* // *Communications of the ACM*. 1975. vol. 18(11). pp. 613–620.

13. Searle J. Indirect speech acts. *Syntax and Semantics, 3:Speech Acts*, ed. P. Cole & J. L. Morgan, New York: Academic Press. 1975. pp. 59–82. (Reprinted in: *Pragmatics: A Reader*, ed. S. Davis, Oxford: Oxford University Press. 1991. pp. 265–277).
14. Sidorov G. Non-linear construction of n-grams in computational linguistics: syntactic, filtered, and generalized n-grams. 2013. 166 p.
15. Sidorov G. Development of an application for dialog in natural language with a mobile robot [Desarrollo de una aplicación para el diálogo en lenguaje natural con un robot móvil] *Research in computing science*. 2013. vol. 62. pp. 95–108. (In Spanish).
16. Sidorov G., Velasquez F., Stamatatos E., Gelbukh A., Chanona-Hernández L. Syntactic N-grams as Machine Learning Features for Natural Language Processing. *Expert Systems with Applications*. 2014. vol. 41(3). pp. 853–860.
17. Sisbot E.A., Ros R., Alami R. Situation assessment for human-robot interaction. *Proc. of 20th IEEE International Symposium in Robot and Human Interactive Communication*. 2011.
18. Skubic M., Perzanowski D., Schultz A., Adams W. Using Spatial Language in a Human-Robot Dialog. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, D.C., 2002.
19. Svanaes D., Seland G. Putting the users center stage: role playing and low-fi prototyping enable end users to design mobile systems. *Proceedings CHI 2004*, Vienna, Austria, Association for Computing Machinery. 2004. pp. 479–486.
20. Topp E.A., Huttenrauch H., Christensen H.I., Severinson E. K. Bringing Together Human and Robotic Environment Representations—A Pilot Study. *Proceedings of the IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Beijing, China. 2006.
21. Wilks Y., Webb N., Setzer A., Hepple M., Catzone R. Machine learning approaches to human dialogue modeling. Edited by J.C.J. van Kuppevelt et al., *Advances in Natural Multimodal Dialogue Systems*. 2005. pp. 355–370.
22. Arkadiev P.M., Serdobolskaya N.V., Zimmerling A.V. [Project of a typological database of syntactic constraints on movement]. *Komp'juternaja lingvistika i intellektual'nye tehnologii, po materialam mezhdunarodnoj konferencii «Dialog 2010»* [Computational linguistics and intellectual technologies, proceedings of the international conference “Dialogue. 2010”]. Moscow. 2010. vol. 9(16). pp. 437–441. (In Russ.).
23. Baranov A.N., Kreidlin G.E. [Illocutive forcement in dialogue structure]. *Voprosy jazykoznanija – Problems of Linguistics*. 1992. vol. 2. pp. 84–99. (In Russ.).
24. Kobozeva I.M., Laufer N.I., Saburova I.G. [Modelling conversation in man-machine systems] *Lingvisticheskoe obespechenie informacionnyh sistem – Linguistic support of information systems*. M.: INION of Academy of Sciences of USSR, 1987. (In Russ.).
25. Prischepa M.V. [Development of the user profile based on the psychological aspects of human interaction with the informational mobile robot]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS proceedings*. 2012. vol. 2(21). pp. 56–70. (In Russ.).

**Кобоzeва Ирина Михайловна** — д-р филол. наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной лингвистики филологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова. Область научных интересов: лингвистическая семантика и прагматика, автоматический семантический анализ текста на ЕЯ. Число научных публикаций — 150. kobozeva@list.ru; МГУ, Ленинские горы, г. Москва, 119991, РФ; р.т. +7(495)939-2601, факс +7(495)939-5596.

**Kobozeva Irina Mikhajlovna** — Ph.D., Dr. Sci., Assoc. professor, professor of the Dept. of Theoretical and Applied Linguistics, Philological Faculty of Moscow State Lomonosov University. Research interests: linguistic semantics and pragmatics, natural language processing.

Number of publications: 150. kobozeva@list.ru; Moscow State Lomonosov University, Leninskije gory, Moscow, 119991, Russia; office phone +7(495)939-2601, fax +7(495)939-5596.

**Сидоров Григорий Олегович** — к-т филол. наук, профессор лаборатории естественно-го языка и обработки текста Центра Компьютерных Исследований Национального Политехнического института (Мексика), национальный исследователь Мексики (SNI 3), главный редактор научного журнала “Computación y sistemas” (Scopus, ISI). Область научных интересов: компьютерная лингвистика, автоматический анализ текста. Число научных публикаций — 190. sidorov@cic.ipn.mx; CIC-IPN, Av. Juan de Dios Bátiz, s/n, Zacatenco, 07738, México DF, Mexico; p.t. +52(55)5729-6000 доб. 56518.

**Sidorov Grigori** — Ph. D., professor, research professor of Natural Language and Text Processing Laboratory, Center for Computing Research, Instituto Politécnico Nacional, Mexico City, Mexico; National researcher of Mexico (SNI 3). Editor-in-Chief of the research journal “Computación y sistemas” (Scopus, ISI). Research interests: computational linguistics, natural language processing. Number of publications: 190. sidorov@cic.ipn.mx; CIC-IPN, Av. Juan de Dios Bátiz, s/n, Zacatenco, 07738, México DF, Mexico; office phone +52(55)5729-6000 ext. 56518.

**Циммерлинг Антон Владимирович** — д-р филол. наук, профессор кафедры русского языка Московского государственного гуманитарного университета имени М. А. Шолохова (МГГУ им. М. А. Шолохова), заведующий лабораторией общей и компьютерной лингвистики МГГУ им. М. А. Шолохова. Область научных интересов: лингвистическая типология, теория грамматики, компьютерная лингвистика. Число научных публикаций — 185. fagraey64@hotmail.com. МГГУ им. М. А. Шолохова, ул. Верхняя Радищевская 16-18, Москва 109240, p.t. +7(495)672-0490.

**Zimmerling Anton** — Ph.D., Dr. Sci., professor of the Russian department, Philological Faculty of Sholokhov Moscow State University for the Humanities (SMSUH), head of the Laboratory of General and Computational Linguistics SMSUH. Research interests: linguistic typology, grammar theory, computational linguistics. Number of publications: — 185. fagraey64@hotmail.com. SMSUH, Verkhnyaya Radishchevskaya str. 16-18, Moscow 109240 office phone +7(495)672-0490.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Мексики (SNI), Национального Политехнического Института (Мексика) (SIP 20120418, 20131441, 20144274, COFAA), Правительства города Мехико (ICYT-DF PICCO10-120), Европейской комиссии FP7-PEOPLE-2010-IRSES грант 269180, и Министерства образования и науки Российской Федерации, федеральный проект (госзадание) 2685 «Параметрическое описание грамматических систем».

**Acknowledgements.** This research is done under partial support of Mexican government (SNI), Instituto Politécnico Nacional, Mexico (projects SIP 20120418, 20131441, 20144274, COFAA), Mexico City government (ICYT-DF project PICCO10-120), FP7-PEOPLE-2010-IRSES: Web Information Quality - Evaluation Initiative (WIQ-EI) European Commission project 269180 and Ministry of education and science of Russian Federation, federal project 2685 “Parametric description of grammar systems”.

## РЕФЕРАТ

*Кобозева И.М., Сидоров Г.О., Циммерлинг А.В.* **Модуль управления диалогом в системе общения пользователя с подвижным роботом-гидом.**

В статье представлен алгоритмический подход к моделированию диалога на естественном языке с подвижным роботом, выполняющим функцию гида. Модель управления диалогом представлена как сеть переходов системы из одного состояния в другое в зависимости от двух факторов: коммуникативного и визуального. Описываются детали модуля управления диалогом. Система диалога с подвижным роботом Pioneer 3DX включает модуль распознавания речи Dragon Naturally Speaking и модуль синтаксического анализа Freeling. Система протестирована для испанского языка, но по своей идеологии не зависит от языкового материала и может быть настроена на другие естественные языки, включая русский. Чем больше функций у робота, тем больше репертуар коммуникативных актов и тем важнее роль интенционального модуля (модели рационального поведения, энциклопедическая информация). В диалоговую модель описываемого робота-гида включены три вида актов — речевые акты, речевые блоки и мультимодальные блоки. Речевые блоки определяются как последовательности речевых актов одного говорящего, связанные единством замысла и предполагающих реакцию адресата на блок как целое. Выделяются пограничные блоки, нарративные блоки и второстепенные блоки. Пограничные блоки запускаются в начальной и конечной фазе диалога с роботом. Нарративные блоки являются текстами, содержащими информацию об объектах показа. Второстепенные блоки произносятся роботом в ситуации переключения с основной цели показа на второстепенную. Мультимодальные блоки — фиксированные последовательности речевых актов и неречевых действий. Модель диалога с роботом, в целом, следует аксиомам коммуникации Грайса. Среди действий робота есть как иллокутивно-зависимые, так и иллокутивно-независимые, т.е. запускаемые по инициативе самого робота. Все действия человека в данном типе диалога являются иллокутивно-зависимыми от действий робота. Любой непредусмотренный в данном типе диалога речевой акт пользователя интерпретируется как ошибка, в этом случае робот возвращается в фазу диалога, непосредственно предшествующему тому речевому акту пользователя, который был распознан как ошибка, и повторяет свой речевой акт.

## SUMMARY

### *Kobozeva I.M., Sidorov G., Zimmerling A.* **Module for dialog management in the interaction system between user and mobile robotic guide.**

This paper presents a dialogue management module for a mobile robot acting as a guide. The model of the dialog management is presented as a network of transitions between states depending on two factors: visual and communicative. Details of the dialogue management module are presented. We adopt algorithmic approach to dialogue modeling. The dialogue system with a mobile robot Pioneer 3DX contains speech recognition module Dragon Naturally Speaking and syntactic parser Freeling. The system is tested for Spanish, but its architecture is language-independent and can be adapted to other natural languages, including Russian. The more functions a robot has, the wider the inventory of communicative acts and the more salient the intentional module (models of rational behavior, encyclopedic information) is. The inventory of the described robot-guide includes three types of acts: speech acts, speech blocks, and multimodal blocks. Speech blocks are defined as sequences of speech acts by the same speaker sharing the same communicative intention and implying that the addressee reacts to the block as a whole unit. We distinguish Borderline Blocks, Narrative Blocks and Secondary Blocks. Secondary blocks are texts containing information about the demonstration objects. Secondary blocks are pronounced by the robot in situations where shifting from the main demonstration task to secondary tasks takes place. Multimodal blocks are fixed sequences of speech acts and nonverbal actions. The described dialogue model with a robot-guide largely conforms to Grice's communication axioms. The robot's actions both include illocutionary-dependent and illocutionary-independent actions, i.e. actions launched by the robot itself. All actions of a human user in this type of dialogue are illocutionary-dependent from the robot's actions. Each unprovided speech act of the user is interpreted as error; in this case the robot returns back to the dialogue phase that immediately preceded the user's speech act recognized as error and repeats its speech act.

Л.И. ЧУБРАЕВА, АН.Л. РОНЖИН, А.В. ШИШЛАКОВ, АЛ.Л. РОНЖИН,  
В.Ф. ШИШЛАКОВ  
**КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ  
ЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ  
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

---

*Чубраева Л.И., Ронжин Ан.Л., Шишлаков А.В., Ронжин Ал.Л., Шишлаков В.Ф.* **Концепция построения интеллектуальных защищенных систем управления для объектов децентрализованной энергетики.**

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы повышения энергоэффективности электроэнергетических комплексов децентрализованной энергетики со сверхпроводниковым оборудованием за счет использования интеллектуальной защищенной диалоговой системы автоматического управления, выполняющей адаптацию комплекса к режимам работы, а также внешним возмущающим воздействиям и проводящей биометрический контроль доступа операторов.

**Ключевые слова:** сверхпроводниковое оборудование, электроэнергетический комплекс, диалоговая защищенная система, биометрическая идентификация личности, распознавание лиц, обобщенный метод Галеркина, интеллектуальное управление.

*Chubraeva L.I., Ronzhin An.L., Shyshlakov A.V., Ronzhin Al.L., Shyshlakov V.F.* **The concept of development of intelligent protected control systems for objects of decentralized energetics.**

**Abstract.** The issues of energy efficiency of decentralized power complexes with superconducting equipment through the use of intelligent protected dialogue system for automatic control, which performs the adaptation to the complex modes of operation, external perturbations and conducting biometric access control of operators, are considered.

**Keywords:** superconducting equipment, electric power complex, interactive secure system, biometric identification, face detection, generalized Galerkin method, intelligent control.

---

**1. Введение.** Проблемы повышения энергоэффективности и энергосбережения на этапах выработки, транспортировки и потребления энергии являются одними из самых актуальных для современной науки и техники. Основные направления решения проблемы можно разделить на две крупные группы: разработка энергоэффективных элементов и устройств и построение эффективных алгоритмов функционирования электроэнергетических комплексов.

В рамках первой группы основные научные исследования и опытно-конструкторские разработки направлены на повышение энергоэффективности за счет: снижения потерь и повышения коэффициента полезного действия электроэнергетических и электромеханических элементов и устройств традиционного исполнения путем применения новых конструкций и материалов; разработки и создания энергоэффективных устройств нетрадиционного исполнения, работающих на

основе эффекта сверхпроводимости; развитие возобновляемой энергетики.

Усилия второй группы научных исследований связаны с разработкой методов синтеза алгоритмов управления сложными существенно нелинейными многорежимными электроэнергетическими объектами, позволяющими повысить энергоэффективность систем и комплексов путем оптимизации режимов работы, а также обеспечить работу в защищенном диалоговом режиме.

Как показывают технико-экономические оценки и маркетинговые исследования, именно высокоэффективные многофункциональные электроэнергетические системы и комплексы децентрализованной энергетики с интеллектуальным управлением в ближайшее время будут широко востребованы энергетикой, промышленностью и другими потребителями.

В настоящее время в ведущих странах мира (США, Япония, Австралия, Германия, Нидерланды, Франция, Италия, Великобритания, Китай и др.) выполняется большой объем теоретических и экспериментальных работ по созданию новых типов устройств для возобновляемой энергетики, в том числе содержащих элементы, работающие с использованием эффекта сверхпроводимости.

В области разработки и создания сверхпроводниковых комплексов можно отметить значительные успехи фирм, занимающиеся ветроэнергетическими установками: American Superconductor Corporation (AMSC), TECO-Westinghouse Motor Company (TWMC), General Electric, Advanced Magnet Lab, Boulder Wind Power, Clipper Windpower, Dehlsen Associates, GE Global Research, National Renewable Energy Laboratory, Zenergy Power и Converteam (бывшая ALSTOM Power Conversion), IEE (Пекин), но при этом ни одна из них не реализует комплексный подход к решению задач повышения энергоэффективности и энергосбережения.

Значительное место в вопросах повышения эффективности и надежности электроэнергетических систем и комплексов занимает человеческий фактор, который остается одной из главных проблем в управлении сложными техническими объектами. Автоматизация процесса аварийного отключения объекта управления, а также проверка личности оператора и мониторинг его текущего состояния – это две в равной степени важные задачи. Использование бесконтактных средств верификации операторов и проверки их состояния в ходе управления объектом позволит своевременно определить экстренные ситуации и записать поведение операторов. Перераспределение функций между автоматической системой управления и операторами, удаленно сопро-

вождающими эксплуатацию объекта, является одним из вариантов повышения качества работы операторов. Для решения этой задачи необходима, в том числе, разработка методов и мобильных средств, отличающихся адаптивностью к вычислительным, сетевым, интерфейсным возможностям устройств операторов.

В электроэнергетических системах и комплексах, в том числе в децентрализованной энергетике, широко используются линейные регуляторы, ориентированные на управление в окрестности некоторой рабочей точки (аналоговые ПИД-регуляторы). В последние годы происходит постепенное внедрение интеллектуальных регуляторов на базе нечеткой (fuzzy control), нейронной (neural control) или нейро-нечеткой (neurofuzzy) технологии, которые служат эффективной заменой традиционным регуляторам. Основным смыслом этого инновационного процесса заключается в том, что интеллектуальный регулятор позволяет описать нелинейный закон управления, расширяющий рабочий диапазон и улучшающий показатели качества переходных процессов.

Вместе с тем, в настоящее время отсутствуют универсальные методики синтеза интеллектуальных регуляторов, поскольку их конструирование требует обработки знаний о поведении сложного объекта, извлечение которых основано на широком использовании имитационных процедур и методов глобальной оптимизации. Интеллектуальный регулятор может быть реализован на базе современных контроллеров, обладающих высокими вычислительными возможностями, что в сочетании с их низкой стоимостью позволяет эффективно реализовывать систему управления.

Очевидно, что проблема повышения энергоэффективности носит ярко выраженный междисциплинарный характер и требует системного подхода по привлечению специалистов различных областей знаний, поскольку успехи в одном из направлений исследований не дают возможность в полной мере обеспечить ее комплексное решение.

В рамках разрабатываемой концепции предлагается обеспечить повышение эффективности электроэнергетических комплексов децентрализованной энергетике со сверхпроводниковым оборудованием путем использования интеллектуальной защищенной диалоговой системы автоматического управления, обеспечивающей адаптацию комплекса к режимам работы и внешним возмущающим воздействиям и распределением вычислительных ресурсов между постом центрального управления и мобильными устройствами.

Многофункциональный электроэнергетический комплекс относится к новому поколению экологически безопасного оборудования децентрализованной энергетике, значительно повышающего качество

жизни населения за счет снижения техногенной нагрузки на окружающую среду и повышения надежности энергоснабжения.

Новизна поставленной задачи заключается в разработке и создании интеллектуальной защищенной диалоговой системы управления многофункциональными электроэнергетическими комплексами для возобновляемой энергетики нового поколения с улучшенными экологическими и технико-экономическими показателями (экономия до 10% первичных ресурсов, до 20-25% энергозатрат в процессе производства). Кроме того, новизна задачи связана как с решением фундаментальных проблем человеко-машинного взаимодействия и разработкой сверхпроводниковых электроэнергетических комплексов нового поколения, так и с выявлением новых научных аспектов, возникающих при проектировании бесконтактных средств верификации операторов и удаленного экспертного сопровождения работы многофункциональных электроэнергетических комплексов.

**2. Автономная электроэнергетическая установка со сверхпроводниковым оборудованием.** В качестве объекта управления рассматривается комбинированная солнечно и ветроэнергетическая установка (СВУ), которая была создана в научно-исследовательский институт инновационных технологий в электромеханике и энергетике ГУАП в рамках выполнения нескольких государственных контрактов Министерства образования и науки Российской Федерации [1-3].

В состав данного комплекса входят сверхпроводниковый синхронный ветрогенератор мощностью 5 кВт, сверхпроводниковые силовые регуляторы тока (сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии (СПИН) и сверхпроводниковые ограничители тока (СОТ)), а также солнечная батарея. Все сверхпроводниковые элементы и устройства комплекса созданы с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

ВТСП устройства, входящие в состав электроэнергетической установки имеют определенные специфические особенности физики функционирования. С точки зрения динамических процессов и построения алгоритма управления ВТСП генератор является существенно более сложным элементом системы, чем генераторы традиционного исполнения с обмотками из меди. Данное обстоятельство обусловлено следующими аспектами.

Во-первых, в процессе работы генератора (при изменении параметров нагрузки) сверхпроводниковая обмотка не должна переходить в резистивное состояние, поскольку в случае этого перехода ее сопротивление резко увеличивается, что может привести к выходу генератора из строя. Причиной такого перехода, в частности, может стать рез-

кое изменение скорости нарастания тока в ВТСП обмотке при скачках нагрузки. Поэтому переход ВТСП обмотки в так называемое «нормальное» состояние с точки зрения построения алгоритма управления должен рассматриваться как аварийный режим работы электроэнергетического комплекса.

Во-вторых, переход сверхпроводящей обмотки в резистивное состояние может произойти не только в случае перегрузок со стороны потребителя, но и при ухудшении условий охлаждения, что для погружной электрической машины, прежде всего, может быть связано с расходом хладагента. Расход хладагента должен контролироваться системой автоматического управления (САУ) и при уменьшении уровня ниже критического значения САУ должна обеспечивать подачу хладагента в генератор.

Для обеспечения надежной работы и решения задач энергоэффективности, интеллектуальная система должна иметь три контура управления (рис. 1).

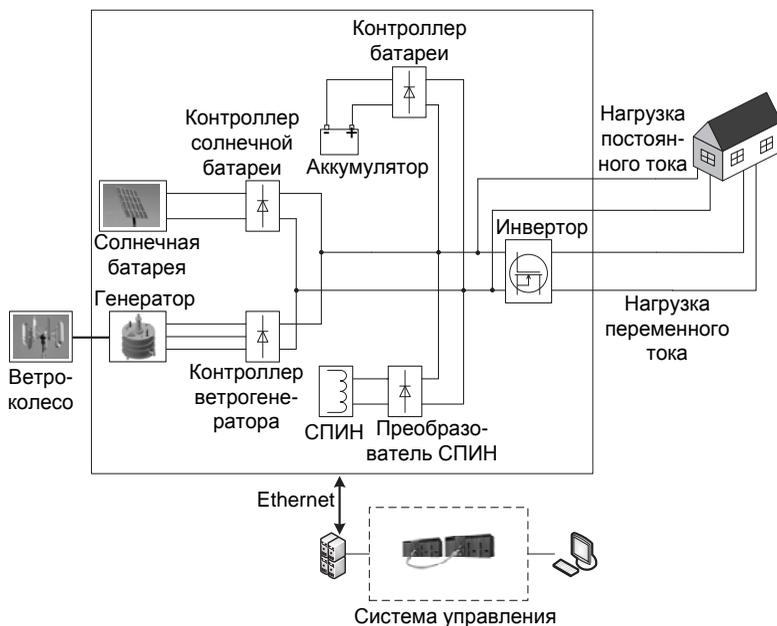


Рис. 1. Структурная схема комбинированной сверхпроводниковой электро-энергетической установки

Первый контур управления реализует жесткий закон регулирования (в том числе и нелинейный) процессов пуска и выхода на номинальный режим работы, а также обеспечение требуемых динамических характеристик при переходе электроэнергетического комплекса из одного установившегося состояния в другое при изменении энергопотребления. Параметры алгоритма управления этого контура целесообразно синтезировать обобщенным методом Галеркина [4 – 10].

Обобщенный метод Галеркина дает возможность с единых математических, методологических и алгоритмических позиций решать задачу синтеза параметров регулятора по заданным показателям качества работы САУ в переходном режиме для широкого класса линейных и нелинейных систем управления: непрерывных, импульсных (различными видами модуляции сигнала), дискретных (с несколькими импульсными элементами, работающими как синхронно, так и не синхронно, с одной и несколькими частотами прерывания), дискретно-непрерывных, в том числе и со звеньями чистого запаздывания. Метод позволяет решать задачу параметрического синтеза САУ указанных классов при минимальных вычислительных затратах, что достигается путем алгебраизации решения задачи и сведения ее к задаче нелинейного программирования с целевой функцией, построенной на основе уравнений Галеркина.

С помощью данного метода были решены задачи параметрического синтеза:

- одномерных линейных и нелинейных систем управления приводами наведения перископического зеркала большого наземного радиотелескопа РТ-70 (дискретная нелинейная САУ, динамика которой описывается дифференциальным уравнением 10 порядка) [6, 7];

- одномерной линейной САУ с амплитудно-импульсной модуляцией большой наземной антенной установкой, уравнение движения которой 17 порядка [6, 7];

- регуляторов многорежимных систем управления торможением колес тяжелых самолетов Ил-86, Ил96-300, как непрерывных, так и импульсных, уравнения описывающие модель торможения (10 – 15 порядка) [6, 7];

- регуляторов в каналах регулирования частоты и напряжения многосвязной линейной и нелинейной математической модели автономной электроэнергетической установки [4,5, 8 – 10].

Второй контур управления обеспечивает переключение потребителя на наиболее экономичный в текущий момент времени источник энергии (солнечная батарея, ВТСП ветрогенератор, аккумуляторная

батарея) в зависимости от внешних условий работы (интенсивность ультрафиолетового излучения, скорость ветра и т.д.).

В последние годы происходит постепенное внедрение интеллектуальных регуляторов на базе нечеткой (fuzzy control), нейронной (neural control) или нейронечеткой (neurofuzzy) технологии, которые служат достаточно эффективной заменой традиционным регуляторам для решения задач управления отдельными электроэнергетическими устройствами [11 – 20].

Однако в настоящее время отсутствуют универсальные методики синтеза интеллектуальных регуляторов, поскольку их конструирование требует обработки знаний о поведении сложного объекта, привлечение которых основано на широком использовании имитационных процедур и методов глобальной оптимизации.

Поэтому при построении алгоритма управления второго контура для решения задач энергоэффективности необходимо сочетание как релейных переключений при достижении заданных пороговых значений управляемых величин, так и использование методов нечеткого управления, дающих возможность использовать нечеткие правила, формируемые на основе опыта эксплуатации солнечных и ветроэнергетических станций традиционного исполнения. Контур управления, построенный на основе принципов нечеткой логики для повышения эффективности работы многофункционального электроэнергетического комплекса с учетом внешних возмущающих воздействий, даст возможность повысить энергоэффективность систем децентрализованной энергетики не менее чем на 15%.

Третий контур представляет собой защищенную диалоговую систему управления, обеспечивающую дистанционное оперативное управление работой электроэнергетического комплекса, прежде всего в случае возникновения нештатных ситуаций, что обусловлено повышенными требованиями по безопасности, предъявляемыми к системам управления СВУ. Привлечение бесконтактных биометрических методов верификации операторов обеспечит дополнительный способ проверки контроля доступа, а также позволит производить мониторинг состояния оператора в процессе управления.

Кроме того, третий контур управления необходим для обеспечения удаленной экспертной поддержки на этапах пуско-наладочных работ сверхпроводникового оборудования в критических ситуациях. Здесь важна не только разработка методов верификации удаленного эксперта, но и создание адаптивных методов распределения вычислительной нагрузки между постом центрального управления и мобильным устройством удаленного эксперта или оператора при обработке и

передаче аудио-, видео, текстовых и других данных, необходимых для взаимодействия лиц, задействованных в процессе эксплуатации электроэнергетического комплекса.

**3. Программный комплекс настройки алгоритма управления электроэнергетическими объектами.** Создание интеллектуальных систем управления электроэнергетическими объектами предполагает синтез алгоритма управления с помощью программного комплекса, реализующего метод решения задач синтеза и оптимизации нелинейных систем, математическую основу которого составляет обращение обобщенного метода Галеркина, а также методов нечеткого управления и построения диалоговых систем взаимодействия с объектом управления.

Разработанный программный комплекс, реализующий обобщенный метод Галеркина, дает возможность осуществлять проектирование электромеханических и электроэнергетических элементов систем рассматриваемого класса с оптимизацией их параметров и конструкции по энергосберегающему критерию оптимальности. Аналогичный подход может быть использован и при оптимизации режимов работы с целью обеспечения энергосбережения и минимизации негативного воздействия на окружающую среду наряду с обеспечением надежности и долговечности.

Программный комплекс, построен по блочно-модульному принципу, что делает его универсальным и дает возможность использовать основной блок комплекса для синтеза элементов, устройств и систем управления различных классов и структур, динамика которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями произвольного (в общем случае  $n$ -го) порядка. Входящие в состав программного комплекса модули объединены общим интерфейсом (рис. 2, 3).

При формировании уникального программного обеспечения для решения задачи синтеза алгоритма управления конкретной САУ в диалоговом режиме пользователь должен выполнить следующие операции:

- задать класс рассматриваемой системы (линейная или нелинейная);
- определить тип модулятора, стоящего в САУ (или в случае непрерывной системы указать на его отсутствие);
- задать вид и параметры внешнего входного воздействия и желаемого программного движения;
- из каталога нелинейных характеристик выбрать требуемые и задать их параметры (пример диалогового окна пока-

зан на рисунке 3);

- задать количество варьируемых параметров и границы изменения их возможных значений;
- определить число этапов и точность поиска значений варьируемых параметров, а также количество шагов на каждом этапе.

Таким образом, с помощью программного комплекса определяются значения варьируемых параметров, доставляющие минимум соответствующей целевой функции, что является косвенной оценкой степени приближения процесса в САУ с синтезированными параметрами к заданному желаемому программному движению. Полученные в результате решения задачи синтеза параметры будут обеспечивать в системе управления приближенное воспроизведение заданных показателей качества ее работы в переходном режиме.

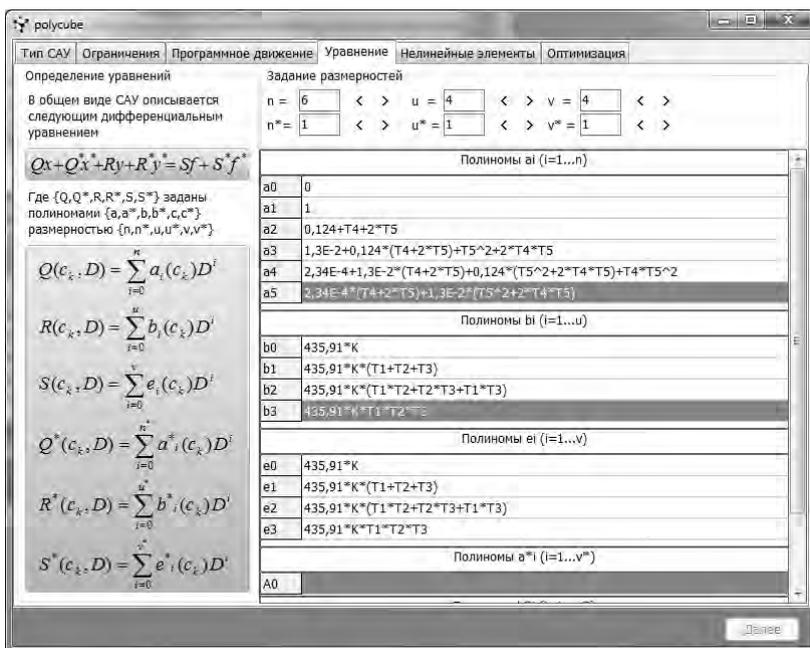


Рис. 2. Интерфейс формирования математической модели синтезируемой САУ

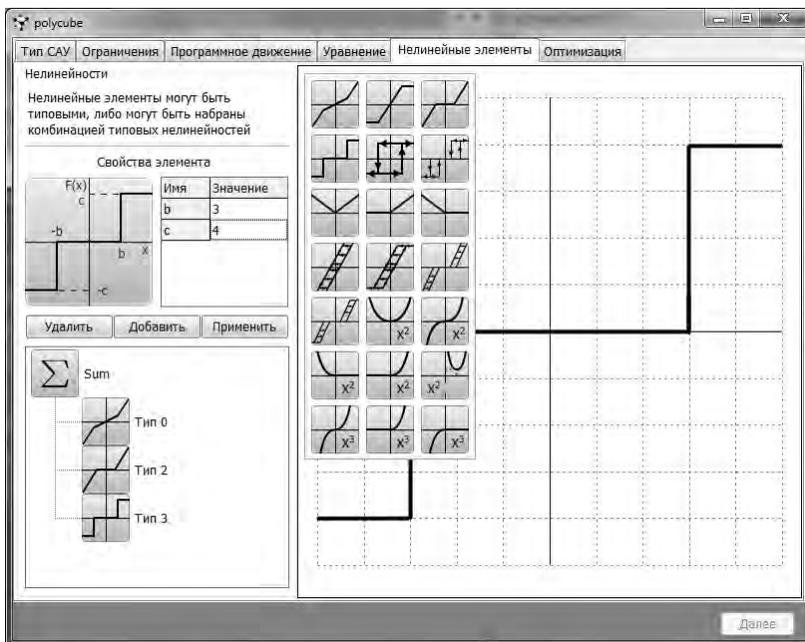


Рис. 3. Каталог типовых нелинейных характеристик

Если же в области заданных ограничений на значения параметров  $c_k$  не будет найдено ни одно сочетание искомых параметров, обеспечивающее выполнение условий устойчивости или минимизации целевой функции, то программа выдаст соответствующую информацию. В этом случае пользователю программного комплекса следует повторить решение задачи после выполнения следующих рекомендаций:

- изменить ограничения на значения варьируемых параметров;
- изменить параметры желаемого программного движения;
- усложнить структуру синтезируемого регулятора.

Все указанные рекомендации возможно выполнить, если это допускается условиями проектирования. Обоснованность подобных рекомендаций обусловлена следующим. При проектировании нелинейных САУ достаточно сложно задать заведомо реализуемое при заданной структуре системы и регулятора программное движение. Поэтому изменение параметров программного движения или структуры регулятора, равно как и технических ограничений на значения искомых параметров может позволить решить задачу параметрического синтеза проектируемой системы управления. Далее рассмотрим аспек-

ты безопасности функционирования объектов децентрализованной энергетики и, в частности проектирования систем биометрической идентификации личности операторов, имеющих допуск к управлению электроэнергетическими объектами [21].

**4. Методы биометрической идентификации личности.** Наиболее распространенными технологиями биометрической идентификации личности являются распознавание отпечатков пальцев и сетчатки глаза, голоса, подписи, лица, геометрии ладони и пальцев [22, 23]. С коммерческой точки зрения популярность технологий биометрической идентификации распределена следующим образом [24]: на первом месте находится распознавание отпечатков пальцев, занимающее 54% рынка; далее идет гибридная технология (14,4%), в которой одновременно задействовано распознавание нескольких типов биометрических данных; на третьем месте технология распознавания лиц (11,5%); далее расположены технологии распознавания геометрии ладони (10%), сетчатки глаза (7,3%), голоса (4,1%), подписи (2,4%), ритма набора текста (0,3%). Первые бесконтактные биометрические системы строились на основе текстозависимых методов определения диктора, более совершенные системы позволяли определить голос говорящего по любой фразе, имеющей длительность, достаточную для принятия решения. В многомодальных биометрических системах, кроме анализа речи диктора, оценивается положение головы, изменение геометрии лица, его освещенности и другие параметры [25], позволяющие определить личность пользователя.

Методы распознавания лиц являются оптимальным компромиссом между надежностью и удобством для пользователя, а также между защищенностью и конфиденциальностью личных данных. В большинстве случаев при распознавании лиц выполняются два основных этапа: 1) определение положения лица пользователя на изображении с простым или комплексным задним фоном; 2) анализ признаков лица, позволяющий идентифицировать пользователя.

Определение наличия и положения лица пользователя осуществляется за счет анализа принадлежности пикселей к переднему (области лица) и заднему фону изображения. На изображениях, где задний фон чистый, т.е. равномерный и однотонный, не сложно определить область лица, но когда он состоит из нескольких слоев, на которых присутствуют другие объекты, эта проблема становится довольно сложной. Обычно для определения области лица применяют методы, основанные на определении ключевых точек лица, например, глаза, носа, губ, или анализирующие цветовое пространство изображения, а также методы использующие другие характерные признаки лица.

После сегментации области лица необходимо выполнить нормализацию параметров по размерам, ориентации, яркости и другим характеристикам. Для выполнения нормализации важно определить ключевые точки лица, относительно которых будет выполнена коррекция параметров. Только после окончания процедуры нормализации можно выполнить процедуру расчета признаков и генерации биометрического шаблона личности, который хранится в базе данных лиц.

Анализ работ последних десяти лет показал, что для решения задачи распознавания лиц применяются методы, основанные на анализе спектральной плотности изображения [26], отдельных частей лица (глаз, нос, рот) [27], дискриминантного анализа и фильтров Габора [28], двумерного анализа главных компонент [29], нейросетевых методов [30] и другие. Применение методов Eigenfaces [31], Fisherfaces [32] и Local Binary Patterns (LBP) [33] позволяет повысить эффективность процесса распознавания лиц в случае малого числа обучающих примеров и при обработке цифровых изображений больших размеров в условиях малой выборки, а также снизить размерность вектора признаков лица и повысить скорость обработки изображений.

Также следует упомянуть, что оценка размытости изображений является необходимым этапом обработки в системах, работающих с большими входными массивами визуальной информации. Предварительная оценка позволяет исключить из области дальнейшего анализа изображения низкого качества, не несущие полезную информацию, экономя тем самым загруженность автоматических систем компьютерного зрения. Возникающая из-за плохих условий съемки размытость происходит вследствие неверной фокусировки снимающего оборудования, либо непредвиденного движения объекта съемки. Она может быть оценена различными методами, среди которых можно выделить: исследование градиента яркости пикселей изображения, отношение значений яркости пикселей на некоторой области, статистический анализ коэффициентов яркости пикселей.

Предложенный метод распознавания лиц основан на применении модифицированных методов LBP [33] и PCA [31] и успешно был апробирован в системе автоматической регистрации участников мероприятия в интеллектуальном зале [34, 35]. Многоэтапная процедура мониторинга зон зала позволяет найти присутствующих в нем участников и записать аудиовизуальные данные, необходимые для проведения идентификации личности присутствующих. Метод аудиовизуальной записи выступлений участников в интеллектуальном зале использует бимодальный аудиовизуальный способ определения активного диктора, обеспечивающий своевременный автоматический захват и

синхронизацию аудио- и видеопотоков данных с записанных выступлений участников [36, 37].

Для повышения скорости обработки и надежности определения качества интересующей области изображения использовались несколько вариантов сегментации части кадра: а именно анализировалось все изображение, область лица и область лица размером 200x200 пикселей. Предложенная процедура предварительного поиска области лица в кадре и оценки ее размытости на основе статистического анализа коэффициентов яркости пикселей позволила определить 94% неискаженных кадров, полученных в ходе автоматической регистрации участников совещания в интеллектуальном зале.

При экспериментальной оценке на базе данных с более чем 55 тыс. фотографий 36 участников была получена точность распознавания лиц 79,5%. Относительно низкий процент обусловлен тем, что область лица в данном эксперименте не превышала 50x50 пикселей, что важно для проведения грубой предварительной оценки. Последующее применение камеры с наведением на лицо пользователя позволяет выполнить более качественную оценку. Такой двухэтапный подход к биометрической оценке личности существенно экономит вычислительные затраты, необходимые при функционировании систем контроля доступа к электроэнергетическим объектам в режиме реального времени.

**5. Заключение.** Рассмотренная концепция построения интеллектуальной защищенной диалоговой системы управления многофункциональными комплексами децентрализованной энергетики, использующих элементы и устройства, работающие на основе эффекта высокотемпературной сверхпроводимости, дает возможность обеспечить системный подход к решению задач по проектированию аналогичных комплексов большой мощности.

Предложенный метод биометрической идентификации личности на основе многоэтапной процедуры мониторинга обслуживаемого помещения был успешно апробирован в системе автоматической регистрации участников мероприятия в интеллектуальном зале и теперь на его основе проводится разработка специализированного модуля биометрического контроля доступа к защищенной диалоговой системе управления объектами децентрализованной энергетики.

## **Литература**

1. Chubraeva L. I., Shyshlakov V. F., Turbanov M. A., Tymofeyev S. S., Volkov D. A. Development of a Model Wind and Solar Power Installation Comprising High-Temperature Superconductors // Energy Science and Technology ISSN 1923-8460 [Print] 1923-8479 [Online] 2013. vol.6 no.2. pp.64 – 70.

2. Андреев Е. А., Волков Д. А., Орлов А. Р., Чубраева Л. И., Шишляков В. Ф. Автономная электроэнергетическая установка с использованием высокотемпературных сверхпроводников // Сверхпроводимость: Исследования и разработки. 2009. №14. С.7-12.
3. Мартынов А. А., Орлов А. Р., Тимофеев С. С., Чубраева Л. И., Шишляков В. Ф. Совместная работа ВТСП устройств автономной электроэнергетической установки // Сверхпроводимость: Исследования и разработки. 2009. №14. С.13-22.
4. Цветков С. А., Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Синтез и моделирование автономной электроэнергетической установки // «Информационно-управляющие системы». 2008. № 4. С.12– 14.
5. Цветков С. А., Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Исследование аномальных режимов работы автономной электроэнергетической установки // «Информационно-управляющие системы», 2009. № 1. С.15-20.
6. Шишляков В. Ф. Синтез нелинейных САУ с различными видами модуляции: Монография. СПб.: СПбГУАП, 1999. 268с.
7. Никитин А. В., Шишляков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: Монография / Под. Ред. В. Ф. Шишлякова. СПб. СПбГУАП, 2003. 358с.
8. Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления обобщенным методом Галеркина // Информационно-управляющие системы. 2006. № 3. С. 51-62.
9. Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления во временной области // изв. Вузов сер. Проблемы энергетики. 2006. № 12. С.49-54.
10. Цветков С. А., Шишляков В. Ф., Шишляков Д. В. Синтез многосвязных систем автоматического управления во временной области // изв. Вузов сер. Приборостроение. 2007. №12. С.13-17.
11. Chandrakar V.K., Kothari A.G. Fuzzy-based Static Synchronous Compensator (STATCOM) for improving transient stability performance // 692 Int. J. Energy Technology and Policy. 2007. vol. 5. no. 6.
12. Kim G.W., Lee K.Y. Coordination control of ULTC transformer and STATCOM based on an artificial neural network // IEEE Trans. Power Systems. 2005. vol. 20. no. 2, pp. 580-586.
13. Rahim A.H.M.A., Nowicki E.P., Bakhashwain J.M. Fuzzy STATCOM Control Strategies for Power System Stabilization // ACSE Journal. 2006. vol. 6. no. 2. pp. 1-9.
14. Eldamaty A. A., Faried S. O., Aboreshaid S. Damping Power System Oscillations Using a Fuzzy Logic Based Unified Power Flow Controller // Electrical and Computer Engineering. 2005. pp. 1950–1953.
15. Gupta N., Jain S. K. Comparative Analysis of Fuzzy Power System Stabilizer Using Different Membership Functions // International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2010. vol. 2. no. 2. pp.1793-8163.
16. Taher S. A., Shemshadi A. Design of Robust Fuzzy Logic Power System Stabilizer // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2007. vol. 27 pp.8-14.
17. Darabi A., Soleamani S.A., Hassannia A. Fuzzy Based Digital Automatic Voltage Regulator of a Synchronous Generator with Unbalanced Loads // American J. of Engineering and Applied Sciences. 2008. vol. 1(4). pp. 280-286.
18. Goel N., Patel R.N., Chacko S. T. Genetically Tuned STATCOM for Voltage Control and Reactive Power Compensation // International Journal of Computer Theory and Engineering. 2010. vol. 2. no. 3. pp. 1793-8201.
19. Kim G. W., Lee K. Y. Coordination control of ULTC transformer and STATCOM based on an artificial neural network // IEEE Transaction on Power System. 2005. vol. 20. no. 2. pp. 580-586.

20. Panda S., Patel R. N., Padhy N. P. Power System Stability Improvement by TCSC Controller Employing a Multi-Objective Genetic Algorithm Approach // *International Journal of Intelligent Technology*. 2006. vol. 1. no. 4. pp. 266-273.
21. Мещеряков Р.В., Савчук М.В. Подходы к внедрению ERP-систем на крупных предприятиях // *Бизнес-информатика*. 2011. № 2. С. 63.
22. Schneiderman H., Kanade T. Object detection using the statistic of parts // *International Journal of Computer Vision*. 2004. vol. 56(3). pp. 151-177.
23. Костюченко Е.Ю., Мещеряков Р.В. Идентификация по биометрическим параметрам при использовании аппарата нейронных сетей // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2007. № 7. С. 39-50.
24. Abate A. F., Nappi M., Riccio D., Sabatino G. 2D and 3D face recognition: A survey // *Pattern Recognition Letters*. 2007. vol. 28. no. 14. pp. 1885–1906.
25. Будков В.Ю., Ронжин А.Л. Комбинированные методы диаризации речи дикторов // *Информационно-измерительные и управляющие системы*, 2013. № 8, С. 74-79.
26. Козлов П.В., Липин Ю.Н., Южаков А.А. Алгоритм распознавания лица человека // *Вопросы защиты информации*. 2011. № 1. С. 52-57.
27. Ющенкова Д.В., Мещеряков Б.Г. Распознавание отдельных черт лица как основа узнавания целого лица // *Экспериментальная психология*. 2010. № 3. С. 84-92.
28. Кашапова Л.Х., Лагышева Е.Ю., Спиридонов И.Н. Алгоритм распознавания эмоционального состояния по изображениям лица с использованием дискриминантного анализа и фильтров габора // *Медицинская техника*. 2012. № 3. С. 1-4.
29. Кухарев Г.А., Щеголева Н.Л. Алгоритмы двумерного анализа главных компонент для задач распознавания изображений лиц // *Компьютерная оптика*. 2010. Т. 34. № 4. С. 545-551.
30. Тропченко А.А., Тропченко А.Ю. Нейросетевые методы идентификации человека по изображению лица // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2012. Т. 55. № 10. С. 31-36.
31. Turk M. A., Pentland A. P. Face recognition using eigenfaces // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - CVPR*, 1991. pp. 586-591.
32. Belhumeur P. N., Hespanha J., Kriegman D. Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1997. vol. 19. no. 7. pp. 711–720.
33. Ahonen T., Hadid A., Pietikainen M. Face Recognition with Local Binary Patterns // *Computer Vision - ECCV 2004*. 2004. pp. 469–481.
34. Ронжин А.Л., Будков В.Ю., Ронжин Ал.Л. Технологии формирования аудиовизуального интерфейса системы телеконференций // *Автоматизация и современные технологии*. 2011. № 5. С. 20-26.
35. Р.М. Юсупов, А.Л. Ронжин. От умных приборов к интеллектуальному пространству // *Вестник Российской Академии Наук: научный и общественно-политический журнал*. 2010. Том 80. Вып. 1. С. 45-51.
36. Ронжин А.Л. Топологические особенности морфологического способа представления словаря для распознавания русской речи // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2008. № 9. С. 12-19.
37. Ронжин А.Л., Будков В.Ю. Технологии поддержки гибридных e-совещаний на основе методов аудиовизуальной обработки // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2011. № 4. С. 31-35.

## References

1. Chubraeva L. I., Shyshlakov V. F., Turubanov M. A., Tymofeyev S. S., Volkov D. A. Development of a Model Wind and Solar Power Installation Comprising High-

- Temperature Superconductors. Energy Science and Technology ISSN 1923-8460 [Print] 1923-8479 [Online] 2013. vol.6 no.2. pp.64 – 70.
2. Andreev E. A., Volkov D. A., Orlov A. R., Chubraeva L. I., Shishlakov V. F. [Autonomous electric power installation using high-temperature superconductors]. *Sverhprovodimost': Issledovanija i razrabotki – Superconductivity Research and Development*. 2009. no. 14. pp. 7-12. (In Russ.).
  3. Martynov A. A., Orlov A. R., Timofeev S. S., Chubraeva L. I., Shishlakov V. F. [Teamwork HTS devices autonomous electrical installation]. *Sverhprovodimost': Issledovanija i razrabotki – Superconductivity Research and Development*. 2009. no. 14. pp. 13-22. (In Russ.).
  4. Cvetkov S. A., Shishlakov V. F., Shishlakov D. V. [Synthesis and simulation of autonomous electrical installation]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. 2008. no. 4. pp.12– 14. (In Russ.).
  5. Cvetkov S. A., Shishlakov V. F., Shishlakov D. V. [Research of abnormal work modes of autonomous electricity plant]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. 2009. no. 1. pp.15-20. (In Russ.).
  6. Shishlakov V. F. *Sintez nelinejnyh SAU s razlichnymi vidami moduljaciei* [Nonlinear ACS with different types of modulation]: Monograph. SPb.: SPbGUAP. 1999. 268 p. (In Russ.).
  7. Nikitin A. V., Shishlakov V. F. *Parametricheskij sintez nelinejnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija* [Parametric synthesis of nonlinear systems of automatic control]: Monograph. edited by. Shishlakov V. F. SPb.: SPbGUAP. 2003. 358 p. (In Russ.).
  8. Shishlakov V. F., Shishlakov D. V. [Parametric synthesis of multivariable systems of automatic control generalized Galerkin]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. 2006. no. 3. pp. 51-62. (In Russ.).
  9. Shishlakov V. F., Shishlakov D. V. [Parametric synthesis of multiply automatic control systems in the time domain]. *Izvestija Vuzov serija Problemy jenergetiki – Proceedings of Higher Education Problems of power series*. 2006. no. 12. pp. 49-54. (In Russ.).
  10. Cvetkov S. A., Shishlakov V. F., Shishlakov D. V. [Multiply synthesis of automatic control systems in the time domain]. *Izvestija Vuzov serija Problemy jenergetiki – Proceedings of Higher Education Problems of power series*. 2007. no. 12. pp. 13-17. (In Russ.).
  11. Chandrakar V.K., Kothari A.G. Fuzzy-based Static Synchronous Compensato (STATCOM) for improving transient stability performance. 692 Int. J. Energy Technology and Policy. 2007. vol. 5. no. 6.
  12. Kim G.W., Lee K.Y. Coordination control of ULTC transformer and STATCOM based on an artificial neural network. IEEE Trans. Power Systems. 2005. vol. 20. no. 2, pp. 580-586.
  13. Rahim A.H.M.A., Nowicki E.P., Bakhshwain J.M. Fuzzy STATCOM Control Strategies for Power System Stabilization. ACSE Journal. 2006. vol. 6. no. 2. pp. 1-9.
  14. Eldamaty A. A., Faried S. O., Aboreshaid S. Damping Power System Oscillations Using a Fuzzy Logic Based Unified Power Flow Controller. Electrical and Computer Engineering. 2005. pp. 1950–1953.
  15. Gupta N., Jain S. K. Comparative Analysis of Fuzzy Power System Stabilizer Using Different Membership Functions. International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2010. vol. 2. no. 2. pp. 1793-8163.
  16. Taher S. A., Shemshadi A. Design of Robust Fuzzy Logic Power System Stabilizer. World Academy of Science, Engineering and Technology. 2007. vol. 27 pp. 8-14.

17. Darabi A., Soleamani S.A., Hassannia A. Fuzzy Based Digital Automatic Voltage Regulator of a Synchronous Generator with Unbalanced Loads. *American J. of Engineering and Applied Sciences*. 2008. vol. 1(4). pp. 280-286.
18. Goel N., Patel R.N., Chacko S. T. Genetically Tuned STATCOM for Voltage Control and Reactive Power Compensation. *International Journal of Computer Theory and Engineering*. 2010. vol. 2. no. 3. pp. 1793-8201.
19. Kim G. W., Lee K. Y. Coordination control of ULTC transformer and STATCOM based on an artificial neural network. *IEEE Transaction on Power System*. 2005. vol. 20. no. 2. pp. 580-586.
20. Panda S., Patel R. N., Padhy N. P. Power System Stability Improvement by TCSC Controller Employing a Multi-Objective Genetic Algorithm Approach. *International Journal of Intelligent Technology*. 2006. vol. 1. no. 4. pp. 266-273.
21. Meshherjakov R.V., Savchuk M.V. [Approach to the implementation of ERP-systems in large enterprises]. *Biznes-informatika – Business Informatics*. 2011. no. 2. p. 63.
22. Schneiderman H., Kanade T. Object detection using the statistic of parts. *International Journal of Computer Vision*. 2004. vol. 56(3). pp. 151-177.
23. Kostjuchenko E.Ju., Meshherjakov R.V. [Biometric identification using neural networks unit]. *Nejrokomp'jutery: razrabotka, primenenie – Neurocomputers: development, application*. 2007. no. 7. pp. 39-50.
24. Abate A. F., Nappi M., Riccio D., Sabatino G. 2D and 3D face recognition: A survey. *Pattern Recognition Letters*. 2007. vol. 28. no. 14. pp. 1885–1906.
25. Budkov V. Yu., Ronzhin A.L. [Combined methods for speaker diarization]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy – Information-measuring and control systems*, 2013. no. 8, pp. 74-79. (In Russ.).
26. Kozlov P.V., Lipin Ju.N., Juzhakov A.A. [Human face recognition algorithm]. *Voprosy zashhity informacii – Information security issues*. 2011. no. 1. pp. 52-57. (In Russ.).
27. Jushhenkova D.V., Meshherjakov B.G. [Recognition of individual facial features as a basis for recognition of the whole face]. *Jeksperimental'naja psihologija – Experimental psychology*. 2010. no. 3. pp. 84-92. (In Russ.).
28. Kashapova L.H., Latysheva E.Ju., Spiridonov I.N. [Emotional state recognition algorithm for face images using discriminant analysis and Gabor filters]. *Medicinskaja tehnik – Medical equipment*. 2012. no. 3. pp. 1-4. (In Russ.).
29. Kuharev G.A., Shhegoleva N.L. [Algorithms for the two-dimensional principal component analysis for face image recognition tasks]. *Komp'juternaja optika – computer optics*. 2010. vol. 34. no. 4. pp. 545-551. (In Russ.).
30. Tropchenko A.A., Tropchenko A.Ju. [Neural network methods for the identification of human facial image]. *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie – Proceedings of the higher educational institutions: Instrumentation*. 2012. vol. 55. no. 10. pp. 31-36. (In Russ.).
31. Turk M. A., Pentland A. P. Face recognition using eigenfaces. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - CVPR*, 1991. pp. 586-591.
32. Belhumeur P. N., Hespanha J., Kriegman D. Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1997. vol. 19. no. 7. pp. 711–720.
33. Ahonen T., Hadid A., Pietikainen M. Face Recognition with Local Binary Patterns. *Computer Vision - ECCV 2004*. 2004. pp. 469–481.
34. Ronzhin A.L., Budkov V.Yu., Ronzhin A.L. [Technologies of audiovisual interface development for teleconference system]. *Avtomatizacija i sovremennye tehnologii – Automation and Modern Technologies*, 2011. no. 5. pp. 20-26. (In Russ.).
35. Yusupov R.M., Ronzhin A.L. [From Smart Devices to Smart Space]. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk: nauchnyj i obshhestvenno-politicheskij zhurnal – Herald*

*of the Russian Academy of Sciences, MAIK Nauka, 2010. vol. 80, no. 1, pp. 45-51. (In Russ.).*

36. Ronzhin A.L. [Topological features morph-phonemic way of presenting vocabulary for Russian speech recognition]. *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tehnologij – Bulletin of Computer and Information Technology*. 2008. no. 9. pp. 12-19. (In Russ.).
37. Ronzhin A.L., Budkov V.Yu. [Support technologies of e-meetings based on methods for audiovisual processing]. *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tehnologij – Bulletin of Computer and Information Technology*. 2011. no. 4. pp. 31-35. (In Russ.).

**Чубраева Лидия Игоревна** — д-р техн. наук, член-корр. РАН, директор института инновационных технологий в электромеханике и энергетике, заведующая кафедрой технической физики, электромеханики и робототехники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения» (ГУАП). Область научных интересов: прикладная сверхпроводимость, электроэнергетические системы и комплексы, возобновляемые источники энергии. Число научных публикаций — более 200. kaf\_32@aanet.ru, 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, р.т. +7 (812) 494-7034

**Chubraeva Lidia Igorevna** — Ph.D., Dr. Sci., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of Institute of Innovative Technologies in Electromechanics and Energy, Chair of technical physics, electromechanics and robotics at The State University of Aerospace Instrumentation (SUAI). Research interests: applied superconductivity, power-engineering systems and complexes, renewable energy sources. The number of publications — more than 200, kaf\_32@aanet.ru, 190000, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya street, 67, office phone +7 (812) 494-7034.

**Ронжин Андрей Леонидович** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технической физики, электромеханики и робототехники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения», заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: автоматическое распознавание речи, многомодальные интерфейсы, аудиовизуальное распознавание речи. Число научных публикаций — 210. ronzhin@iias.spb.su; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-7081, факс +7(812)328-7081.

**Ronzhin Andrey Leonidovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of technical physics, electromechanics and robotics at The State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Deputy director for research of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: automatic speech recognition, multimodal interfaces, audio-visual speech recognition. The number of publications — 210. ronzhin@iias.spb.su; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-7081, fax +7(812)328-7081.

**Шшлаков Андрей Владиславович** — ассистент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения». Область научных интересов: методы синтеза нелинейных систем управления, электроэнергетические ком-

плексы, сверхпроводимость. Число научных публикаций — 15. kaf\_32@aanet.ru, 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, р.т. +7 (812) 494-7034

**Shyshlakov Andrey Vladislavovich** — assistant of technical physics, electromechanics and robotics at The State University of Aerospace Instrumentation (SUAI). Research interests: methods of synthesis of non-linear control systems, power-engineering complexes, superconductivity. The number of publications — 15, kaf\_32@aanet.ru, 190000, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya street, 67, office phone +7 (812) 494-7034.

**Ронжин Александр Леонидович** — к-т техн. наук, научный сотрудник лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: компьютерное зрение, многоканальная обработка аудиовизуальных сигналов, интеллектуальное пространство. Число научных публикаций — 35. ronzhinal@iias.spb.su; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-7081, факс +7(812)328-7081.

**Ronzhin Alexander Leonidovich** — Ph.D., researcher, Laboratory of Speech and Multimodal Interfaces St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: computer vision, multichannel audiovisual signal processing, intelligent space. The number of publications — 35. ronzhinal@iias.spb.su; SPIIRAS, 39, 14-th line, St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-7081, fax +7(812)328-7081.

**Шишлаков Владислав Федорович** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технической физики, электромеханики и робототехники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения». Область научных интересов: методы синтеза нелинейных систем управления, электроэнергетические комплексы, сверхпроводимость, энергоэффективность. Число научных публикаций — 170. svfmail@yandex.ru, 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, р.т. +7(812)494-7034

**Shyshlakov Vladislav Fedorovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of technical physics, electromechanics and robotics at The State University of Aerospace Instrumentation (SUAI). Research interests: methods of synthesis of non-linear control systems, power-engineering complexes, superconductivity, energy-efficiency. The number of publications — 170, svfmail@yandex.ru, 190000, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya street, 67, office phone +7(812)494-7034.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-0741-а).

**Acknowledgements.** This research is partially supported by RFBR (grant 13-08-0741-a).

## РЕФЕРАТ

*Чубраева Л.И., Ронжин Ан.Л., Шишлаков А.В., Ронжин Ал.Л., Шишлаков В.Ф.* **Концепция построения интеллектуальных защищенных систем управления для объектов децентрализованной энергетики.**

Целью исследования является разработка концепции построения интеллектуальной защищенной диалоговой системы управления электроэнергетическим комплексом открытой архитектуры со сверхпроводниковым оборудованием, обеспечивающей повышение энергоэффективности работы во всех режимах функционирования и повышение безопасности и надежности работы оборудования. Разработка концепции направлена на повышение энергоэффективности электроэнергетических комплексов децентрализованной энергетики со сверхпроводниковым оборудованием за счет использования интеллектуальной защищенной диалоговой системы автоматического управления, выполняющей адаптацию комплекса к режимам работы и внешним возмущающим воздействиям и распределением вычислительных ресурсов между постом центрального управления и мобильными устройствами. Реализация предлагаемых подходов при разработке и создании интеллектуальной защищенной диалоговой системы управления многофункциональными электроэнергетическими комплексами децентрализованной энергетики нового поколения даст возможность повысить энергоэффективность на этапе выработки, транспортировки и потребления энергии до 20-25%.

## SUMMARY

*Chubraeva L.I., Ronzhin An.L., Shyshlakov A.V., Ronzhin Al.L., Shyshlakov V.F.* **The concept of development of intelligent protected control systems for objects of decentralized energetics.**

The purpose of this research is to develop the concept of development of intelligent protected dialogue systems for control of electric power complex with open architecture and superconducting equipment, ensuring energy efficiency in all functioning modes, improving safety and reliability of equipment. Within the developing concept the energy efficiency of electric power systems with decentralized power superconducting equipment through the use of intelligent protected dialogue system of automatic control, performing complex adaptation to the functioning modes and external perturbations and the distribution of computing resources between the central control post and mobile devices are provided. Realization of the proposed approaches in the development and creation of intelligent protected dialogue system for control of multifunctional electric complexes of decentralized energetics of a new generation will enable to improve energy efficiency at the stage of production, transportation and energy consumption up to 20-25%.

И.Н. ПАЛАМАРЬ, С.С. ЮЛИН  
**ПОРОЖДАЮЩАЯ ГРАФИЧЕСКАЯ ВЕРОЯТНОСТНАЯ  
МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ ГЛАВНЫХ МНОГООБРАЗИЙ**

---

*Паламарь И.Н., Юлин С.С. Порождающая графическая вероятностная модель на основе главных многообразий.*

**Аннотация.** В статье предлагается порождающая графическая вероятностная модель со скрытыми состояниями на основе нелинейных главных многообразий, заданных в виде сетки узлов, для решения задачи классификации временных последовательностей. В качестве метода аппроксимации обучающих данных сеткой узлов использован алгоритм самоорганизующихся карт Кохонена. Модель представлена в виде фактор-графа с описанием применяемых фактор-функций. Разработан метод обучения и вероятностного вывода на предлагаемой модели. Проведена оценка качества классификации предлагаемой модели в сравнении с существующими моделями (HMM, HCRF) на различных наборах данных из репозитория UCI, в том числе проведена сравнительная оценка при малом количестве обучающих данных.

**Ключевые слова:** классификация временных последовательностей, самоорганизующаяся карта Кохонена, скрытые Марковские модели, условные случайные поля со скрытыми состояниями.

*Palamar I.N., Yulin S.S. Generative probabilistic graphical model base on the principal manifolds.*

**Abstract.** The paper deals with a generative probabilistic graphical model with hidden states based on nonlinear principal manifolds specified as a grid of nodes to solve the problem of classification of sequences or time-series data. Kohonen's self-organizing map is used to approximate the training data as the grid nodes. The model is presented in factor-graph form the used factor-functions description. Method of learning and probabilistic inference is developed on the proposed model. Evaluated quality of the classification of the proposed model is compared with existing models (HMM, HCRF) on different sets of data from the UCI repository, including a comparative evaluation in the case when small amount of the training data is available.

**Keywords:** sequence classification, self-organizing map, HMM, HCRF.

---

**1. Введение.** Графические вероятностные модели со скрытыми состояниями используются в основном для решения задач классификации временных последовательностей [1]. К таким задачам относятся: распознавание речи, рукописного текста, жестов рук или головы, распознавание неисправностей (аварий) промышленных установок. Задача классификации формулируется как нахождение соответствия между наблюдаемой последовательностью данных и классом, к которому эти данные можно отнести. Для её решения хорошо зарекомендовали себя методы машинного обучения, основанные на таких графических вероятностных моделях как скрытые Марковские модели (HMM) [2] и условные случайные поля со скрытыми состояниями (HCRF) [3, 4]. Необходимо отметить, что HMM относится к классу порождающих мо-

делей, HCRF – к классу дискриминантных моделей. Обучение порождающих моделей состоит в нахождении параметров распределения вероятностей  $p(x)$  (где  $x$  – наблюдаемые данные), наилучшим образом описывающих данные каждого класса, в то время как обучение дискриминантных моделей состоит в нахождении гиперплоскости, наилучшим образом разделяющей данные каждого класса. Основная работа в сравнении порождающих и дискриминантных классификаторов была проведена в 2002 году *Andrew Ng* и *Michael Jordan* [5]. Дискриминантный и порождающий подход к классификации сравнивались на примере наивного Байесовского классификатора и модели линейной логистической регрессии. В результате было теоретически доказано и эмпирически проверено на 15 различных наборах данных из репозитория UCI, что дискриминантному классификатору необходимо  $p$  обучающих данных для достижения своей асимптотически минимальной ошибки классификации, тогда как порождающему классификатору необходимо  $\log(p)$  обучающих данных. Возможность обучения на малом количестве данных является важной особенностью классификаторов и наиболее актуальна в случае длительного или дорогостоящего процесса получения обучающей выборки.

К недостаткам порождающих моделей следует отнести то, что выбор формы функции плотности распределения вероятностей (нормальное, экспоненциальное и т. д.), накладывает ограничения на применимость порождающих моделей, так как не все данные соответствуют тем или иным известным параметрическим семействам распределений вероятностей. Кроме того, так как наблюдаемые данные представляют собой многомерные вектора признаков, то оценка параметров распределений в случае наличия линейных зависимостей среди признаков вектора является затруднительной или невозможной [6, 7].

Таким образом, цель данной работы – разработка графической вероятностной модели, аппроксимирующей обучающие данные без выполнения оценки параметров функции плотности распределения вероятностей появления наблюдаемых данных и позволяющей улучшить качество классификации в сравнении с классификатором на основе НММ.

В данной работе предлагается графическая вероятностная модель на основе аппроксимации обучающих данных главными многообразиями малой размерности, заданными в виде сетки узлов, методы её обучения и вероятностного вывода. В качестве алгоритма построения сетки узлов используется алгоритм самоорганизующихся карт Кохонена [8]. Предлагаемая в работе модель и методы её обучения основываются на комбинации элементов, используемых в метрическом и

байесовском подходах к классификации. Порождающий подход к классификации подразумевает построение отдельной модели для каждого класса. Частью параметров этой модели являются значения узлов аппроксимирующей сетки. Такой набор, как правило, является уникальным для каждого класса, благодаря чему представляется возможным выполнение классификации на его основе за счет оценки расстояния от классифицируемых данных до сетки узлов, соответствующих классов. Нормированное от 0 до 1 расстояние от наблюдаемых данных до каждого узла сетки может являться аналогом вероятности появления наблюдаемых данных в скрытых состояниях и использоваться в алгоритмах вероятностного вывода на предлагаемой модели.

В настоящее время существуют работы [9, 10], рассматривающие НММ совместно с самоорганизующимися картами Кохонена, которые используются для решения задачи инициализации математического ожидания перед оценкой параметров распределения вероятностей  $p(x)$  по обучающим данным алгоритмом Баума-Велша. Также известны работы, например [11], использующие сети векторного квантования как способ сокращения размерности пространства признаков для классификатора НММ.

Кроме непрерывных НММ с гауссовой функцией плотности вероятности существуют дискретные НММ с дискретным распределением и аппроксимацией распределения с помощью сетей векторного квантования [12, 13], но данный подход показал свою несостоятельность в связи с низким качеством классификации (уступающим непрерывным НММ) и требованием наличия большого объема обучающих данных.

В отличие от описанных выше работ, в данной работе предлагается порождающая графическая вероятностная модель, не требующая оценки вероятности появления наблюдаемых данных.

Широко используются модели ANN/НММ (*Artificial Neural Network/Hidden Markov Model*) для классификации временных последовательностей на основе объединения нейронных сетей, таких как нейронные сети с задерживанием времени (TDNN) или рекуррентные нейронные сети (RNN), и скрытых Марковских моделей (НММ) [14]. Эти модели и модель, описанную в данной работе, объединяет общая идея выполнения аппроксимации обучающих данных без оценки параметров функции плотности распределения вероятностей появления наблюдаемых данных. В модели ANN/НММ наблюдаемые данные аппроксимируются параметрами нейронной сети. Каждое скрытое состояние НММ связывается с соответствующим нейроном выходного слоя. Вероятность появления некоторого наблюдения в текущем со-

стоянии оценивается как частота активации соответствующего нейрона выходного слоя.

В отличие от модели ANN/HMM, в данной работе описана модель, в которой каждое скрытое состояние графической вероятностной модели является узлом самоорганизующейся карты, а вместо оценки частоты активации соответствующего нейрона выходного слоя производится оценка расстояния между наблюдением и узлом карты.

**2. Аппроксимация данных главными многообразиями.** Задача аппроксимации данных нелинейными многообразиями формулируется следующим образом. Дано конечное множество  $n$ -мерных векторов  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m \in R^n$ . Для каждого  $k = 0, 1, \dots, n-1$  среди всех  $k$ -мерных нелинейных многообразий в  $R^n$  найти такое  $M_k \subset R^n$ , что сумма квадратов уклонений  $\bar{x}_i$  от  $M_k$  минимальна:

$$\sum_{i=1}^m dist^2(\bar{x}_i, M_k) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $dist(\bar{x}_i, M_k)$  – расстояние от точки в  $R^n$  до нелинейного многообразия.

Так как вид параметрической зависимости координат точек многообразия неизвестен (нет априорных соображений о структуре данных), то задача построения неограниченного нелинейного многообразия, то есть вычисления координат каждой из его точек, является весьма трудоемкой с точки зрения вычислений. Исходя из этого, многообразию считают ограниченным и задают конечным числом точек, то есть строят точечную аппроксимацию многообразия, называемую сеткой узлов, с заданным на ней отношением соседства [15, 16]. Тогда выражение (1) можно переписать в виде минимизации евклидова расстояния от точки данных до узлов сетки лежащих на нелинейном многообразии:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p \|\bar{x}_i - \bar{w}_j\|_2 \rightarrow \min,$$

где  $\bar{w}_j$  – координата  $j$ -ого узла сетки в  $R^n$ ,  $\bar{w}_j \in M_k$ ;  $p$  – количество узлов в сетке.

Методы построения нелинейных многообразий малой размерности хорошо справляются с задачей нахождения характерных особенностей данных, отбрасывая при этом шумовые составляющие. Так как неотъемлемой характеристикой любого классификатора является

способность к обобщению, то это свойство нелинейных многообразий будет использовано для построения на его основе предлагаемого классификатора временных последовательностей. Сформулировать основную задачу методов построения нелинейных многообразий в предлагаемой модели можно как задачу аппроксимации обучающих данных для каждого класса соответствующими главными многообразиями, заданными в виде сетки узлов. Так как точность аппроксимации напрямую зависит от количества узлов в сетке и влияет на обобщающую способность классификатора, то данная особенность позволяет добиться приемлемого качества классификации даже при малом наборе обучающих данных, путем подбора оптимального количества узлов в сетке. Следовательно, недостаток обучающих данных, может быть компенсирован введением дополнительных узлов аппроксимирующей сетки.

**3. Описание предлагаемой графической вероятностной модели.** За основу предлагаемой модели взята структура скрытой Марковской модели, которая представляет собой граф из двух типов вершин, соответствующих двум типам случайных величин (наблюдаемые и скрытые), и ребер между ними. Ребра характеризуют статистическую зависимость вершин и соединяют их, исходя из следующих двух правил:

- текущая наблюдаемая случайная величина связана со скрытой случайной величиной, соответствующей текущему моменту времени;
- скрытая случайная величина, соответствующая текущему моменту времени, связана со скрытой случайной величиной, соответствующей предыдущему моменту времени.

Структура скрытой Марковской модели изображена на рисунке 1.

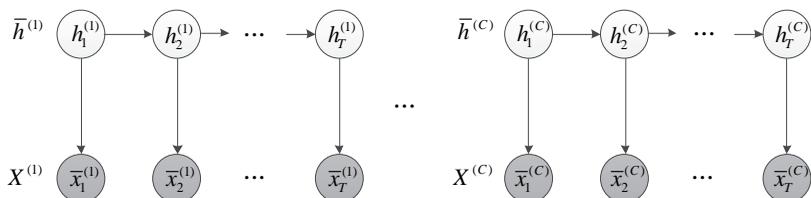


Рис. 1. Структура скрытой Марковской модели (одна модель для каждого класса  $y = 1..C$ )

Совместное распределение переменных скрытой Марковской модели выглядит как:

$$p(\bar{h}, X) = \prod_{t=1}^T p(h_t | h_{t-1}) \cdot p(\bar{x}_t | h_t), \quad (2)$$

где  $\bar{h}$  – вектор скрытых случайных величин (вектор состояний);  
 $X = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_T\}$  – упорядоченное множество векторов, характеризующих наблюдаемую последовательность;  
 $\bar{x}_t$  – вектор наблюдаемых случайных величин;  
 $t$  – номер текущего наблюдения;  
 $T$  – длина временной последовательности;  
 $p(h_t | h_{t-1})$  – распределение вероятностей перехода между состояниями;  
 $p(\bar{x}_t | h_t)$  – распределение вероятностей появления наблюдения  $\bar{x}$  в состоянии  $h_t$ .

Выражение (2) представляет собой совместное распределение вероятностей всех случайных величин в графе, факторизованное в произведение двух условных распределений вероятности, составленных в соответствии с двумя правилами, описанными выше.

Так как предлагаемая модель не предполагает оценки параметров распределения  $p(x)$ , то целесообразным является описать структуру модели с помощью фактор-графа. В теории графических вероятностных моделей понятие фактора  $\Psi(V_1, \dots, V_k)$  определяется как некоторая функция  $\Psi: Val(V_1), \dots, Val(V_k) \rightarrow R$  от значений случайных величин  $V_1, \dots, V_k$ , где  $Val(V_k)$  – значения, принимаемые случайной величиной  $V_k$ . Фактор может представлять как условное, так и совместное распределение вероятностей случайных величин, а в общем случае любую функциональную зависимость.

Структура предлагаемой графической вероятностной модели изображена на рисунке 2.

Совместное распределение переменных предлагаемой модели представляется как произведение факторов, описываемое следующим выражением:

$$p(\bar{u}, X) = \prod_{t=1}^T p(u_t | u_{t-1}) \cdot \Psi(u_t, \bar{x}_t),$$

где  $\bar{u}$  – вектор случайных величин, соответствующих номерам узлов аппроксимирующей сетки, каждая случайная величина принимает значение от 1 до количества узлов;

$p(u_t | u_{t-1})$  – распределение вероятностей перехода между состояниями (между узлами аппроксимирующей сетки);

$\Psi(u_t, \bar{x}_t)$  – нормированная фактор-функция, определяющая связь между текущим узлом аппроксимирующей сетки и текущим наблюдаемым отсчетом временной последовательности.

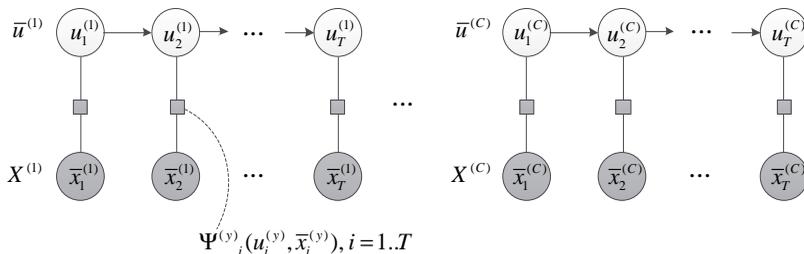


Рис. 2. Структура предлагаемой модели в виде вероятностного фактор-графа (одна модель для каждого класса  $y = 1..C$ )

Построение порождающего классификатора на основе графической вероятностной модели классификации сводится к оценке параметров совместного распределения всех случайных величин, заданных на структуре такой модели методом максимального правдоподобия (*Maximum Likelihood* (ML)). Для каждого класса образов (временных последовательностей) необходимо найти собственное совместное распределение. По факту наибольшего правдоподобия параметров той или иной модели наблюдаемым данным и выполняется процедура классификации.

**4. Обучение модели и выполнение классификации.** Рассмотрим этапы обучения модели. Пусть дано обучающее множество  $Z^{(y)} = \{X_1^{(y)}, X_2^{(y)}, \dots, X_m^{(y)}\}$  – неупорядоченный набор последовательностей наблюдений длины  $m$  соответствующих классу  $y$ ,  $y = 1..C$ , где  $C$  – количество классов, а  $X_i^{(y)} = \{\bar{x}_1^{(y)}, \bar{x}_2^{(y)}, \dots, \bar{x}_T^{(y)}\}$  –  $i$ -ая последовательность наблюдений длины  $T$ , представляющая собой упорядоченный набор векторов-признаков  $\bar{x}_t^{(y)}$ , где  $t = 1..T$ .

Обучение представляет собой оптимизацию целевой функции:

$$L(W, A) = \prod_{\forall X \in Z} \prod_{t=1}^T p(u_t | u_{t-1}) \cdot \Psi(u_t, \bar{x}_t) \rightarrow \max,$$

где  $W$  – множество значений узлов аппроксимирующей сетки;  $A$  – матрица вероятностей переходов между узлами сетки.

В результате обучения получим модели  $M_y = \{W, A\}$  для каждого класса  $y$ . Для обучения предлагаемой модели разработан алгоритм, состоящий из трех этапов.

**Первый этап.** Этап заключается в нахождении значений узлов аппроксимирующей сетки и соответствует стандартному алгоритму обучения самоорганизующейся карты Кохонена путем выполнения одной эпохи обучения карты. Для каждого класса  $y$  строится отдельная аппроксимирующая сетка узлов на наборе данных  $Z^{(y)}$ . В результате обучения каждому узлу  $u_i, i = 1..N$ , где  $N$  – количество узлов, будет соответствовать весовой вектор  $\bar{w}_i$ .

**Второй этап.** Этап состоит в оценке условного распределения вероятностей  $p(u_t | u_{t-1})$ .

Оценка распределения дискретной случайной величины по методу максимального правдоподобия сводится к подсчету частоты наблюдения того или иного события. В данном случае таким событием является переход из одного узла сетки в другой, а оценка условного распределения вероятностей  $p(u_t | u_{t-1})$  выполняется как вычисление выражения:

$$p(u_t | u_{t-1}) = A, A(i, j) = \alpha_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{\sum_{j=1}^N \gamma_{ij}},$$

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} \gamma_{ij} + 1, & \text{если } i = u_{t-1} = \arg \min_u \|\bar{w} - \bar{x}_{t-1}\| \\ & u \\ & j = u_t = \arg \min_u \|\bar{w} - \bar{x}_t\| \\ \gamma_{ij}, & \text{в противном случае} \end{cases},$$

где  $\gamma_{ij}$  – количество переходов от одного узла карты с номером  $i$  к другому – с номером  $j$  в рамках одной последовательности,  $i, j = 1..N$ ;  $u_t$  – номер узла карты, соответствующий вектору  $\bar{x}_t$ .

При оценке  $p(u_t | u_{t-1})$  по методу максимального правдоподобия при большом количестве узлов сетки и при малом количестве обучающих данных не все вероятности переходов будут оценены. Исходя из этого, а также с целью внести регуляризацию в модель, мы произ-

водим оценку по методу апостериорного максимума (*Maximum a posteriori* (MAP)). В качестве априорного распределения выберем распределение Дирихле. Тогда выражение для оценки  $p(u_i | u_{i-1})$  по методу апостериорного максимума запишем как:

$$A(i, j) = \alpha_{ij} = \frac{\gamma_{ij} + \theta_i}{\sum_{j=1}^N \gamma_{ij} + \sum_{j=1}^N \theta_i},$$

где  $\theta_i$  – параметр распределения Дирихле.

Так как в большинстве случаев какая-либо дополнительная информация о наиболее или наименее вероятных переходах отсутствует, то будем предполагать, что  $\theta_i$  принимает одно и то же значение, одинаковое для всех  $i$ . Параметр  $\theta_i$  оценивается на проверочной выборке (*validation set*).

**Третий этап.** Этап заключается в вычислении правдоподобия параметров полученной модели обучающим данным и последующем анализе изменения значения правдоподобия:

- если правдоподобие модели после текущей эпохи обучения самоорганизующейся карты не изменилось или уменьшилось, то процедура обучения останавливается и полученная модель признается оптимальной;

- если правдоподобие возросло, то выполняется переход к первому, а затем второму этапам обучения, и выполняется следующая эпоха обучения карты.

Сходимость такой процедуры обучения обеспечена сходимостью алгоритма обучения самоорганизующейся карты Кохонена, который гарантирует прекращение изменения значений узлов карты при большом количестве эпох обучения, что приведет к прекращению изменения значений правдоподобия в описанном выше алгоритме обучения и остановке процедуры обучения.

Непосредственно сама процедура классификации выполняется следующим образом. Пусть дано тестовое множество  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$  – неупорядоченный набор последовательностей наблюдений длины  $m$  без указания принадлежности к классу, где  $b_i = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_T\}$  –  $i$ -ая последовательность наблюдений длины  $T$ , представляющая собой упорядоченный набор векторов-признаков  $\bar{x}_i$ ,

где  $t = 1..T$ . Тогда классификация последовательности  $b_i$  выполняется как вычисление выражения:

$$y_0 = \arg \max_{y=1..C} (L(b_i | M_y = \{W, A\})),$$

где  $L(b_i | M_y = \{W, A\})$  – правдоподобие модели  $M_y$  класса  $y$  наблюдаемой последовательности  $b_i$ .

Учитывая то, что предложенная модель для классификации основана на комбинации теории построения нелинейных главных многообразий и теории вероятностных графических моделей в дальнейшем для краткости наименования будем использовать аббревиатуру NPM-PGM (*Nonlinear Principal Manifolds - Probabilistic Graphical Model*).

**5. Вероятностный вывод на графической модели.** Вычисление правдоподобия параметров графической вероятностной модели со скрытыми состояниями является NP-полной задачей. Но благодаря использованию Марковского предположения о зависимости текущего состояния модели только от предыдущего, можно воспользоваться эффективным алгоритмом динамического программирования, называемым алгоритмом «прямого-обратного хода», применяемым для вычисления правдоподобия, как в скрытых Марковских моделях, так и в условных случайных полях со скрытыми состояниями. Для вычисления правдоподобия используется только «прямой ход» данного алгоритма.

Логарифм правдоподобия модели  $M_y$  класса  $y$  наблюдаемой последовательности  $X$  вычисляется как:

$$L(X | M_y = \{W, A\}) = \ln \sum_{u_1, u_2, \dots, u_T} \prod_{t=1}^T p(u_t | u_{t-1}) \cdot \tilde{\Psi}(u_t, \bar{x}_t).$$

Для того чтобы вычислить значение правдоподобия необходимо получить значение ненормированного фактора  $\tilde{\Psi}(u_t, \bar{x}_t)$ , которое определим как:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}(u_t, x_t) &= \tilde{B}, \\ \tilde{B}(i, t) &= \tilde{\beta}_{it} = -d(\bar{w}_i, \bar{x}_t), \end{aligned}$$

где  $d(\bar{w}_i, \bar{x}_i)$  – расстояние от весового вектора  $\bar{w}_i$  узла  $i$  до наблюдаемого вектора  $\bar{x}_i$ ,  $t=1..T, i=1..N$  в заданном метрическом пространстве.

Метрика  $d(\bar{w}_i, \bar{x}_i)$  выбирается, исходя из особенностей данных. В данной работе рассматривается только евклидово пространство, в котором  $d(\bar{w}_i, \bar{x}_i) = \|\bar{w}_i - \bar{x}_i\|_2$ .

Взятие расстояния со знаком «минус» необходимо для создания аналогии с вероятностью. Чем больше значение вероятности, тем более вероятно соотнесение наблюдения  $\bar{x}$  к состоянию  $i$ . В случае замены понятия вероятности на понятие расстояния получаем обратную зависимость – чем больше значение расстояния, тем менее вероятно соотнесение наблюдения  $\bar{x}$  к узлу карты  $i$ . Это несоответствие позволяет устранить смена знака значения расстояния.

Для того чтобы значения такого фактора можно было использовать для вычисления правдоподобия необходимо нормировать значения элементов матрицы  $\tilde{B}$  от 0 до 1, так чтобы сумма всех элементов матрицы  $\tilde{B}$  по столбцам составляла единицу, то есть сформировать матрицу  $B$  удовлетворяющую двум условиям:

1.  $0 < B(i, t) \leq 1$ ;
2.  $\sum_{i=1}^N B(i, t) = 1$ .

Нормирование значений распределения вероятностей является стандартной процедурой математической статистики зачастую используемой для нормирования гистограмм распределений. Применим эту процедуру для нормирования расстояний.

Нормирование можно произвести следующим способом:

$$B(i, t) = \frac{\tilde{B}(i, t)}{\sum_{i=1}^N \tilde{B}(i, t)}.$$

Следует отметить, что расстояние от наблюдения  $\bar{x}_i$  до узлов карты  $i, i=1..N$  носит сильно неравномерный характер, в том смысле, что величина значения расстояния до большинства узлов карты будет иметь большое значение, и лишь для нескольких или одного узла («узла победителя») она будет иметь достаточно малое значение. В связи с этим предложено использовать нормирование в логарифмиче-

ском пространстве с вычитанием максимальных значений. Итоговое выражение для вычисления правдоподобия выглядит как:

$$\begin{aligned}
 L(X | M_y = \{W, A\}) &= \ln \sum_{u_1, u_2, \dots, u_T} \prod_{t=1}^T p(u_t | u_{t-1}) \cdot \Psi(u_t, \bar{x}_t) + \sum_{t=1}^T l_t = \\
 &= \ln \sum_{u_1, u_2, \dots, u_T} \beta_{11} \cdot \alpha_{12} \cdot \beta_{22} \cdot \dots \cdot \alpha_{T-1, T} \cdot \beta_{TT} + \sum_{t=1}^T l_t.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

**6. Эксперименты и анализ результатов.** Проведем сравнительную оценку моделей НММ, HCRF и предлагаемой модели (NPM-PGM) в решении задачи классификации на наборах данных из репозитория машинного обучения UCI [17, 18]. Описание данных приведено в таблице 1. Параметры тестируемых классификаторов приведены в таблице 2.

Приведем характеристики используемых наборов данных:

1) набор данных «*Spoken Arabic Digit Data Set*». Набор данных из 8800 (10 слов × 10 повторений × 88 говорящих) произнесенных цифр на арабском языке, представляющих собой временные последовательности из 13 MFCC коэффициентов, полученных путем цифровой обработки слов, произносимых носителями арабского языка в возрасте от 18 до 40 лет в составе 44 женщин и 44 мужчин. Частота дискретизации речевого сигнала – 11025 Гц;

2) набор данных «*Character Trajectories Data Set*». Траектории движения пера полученные при написании букв английского алфавита на планшете «*Wacom*». Данные состоят из трех параметров: координата точки по оси абсцисс, оси ординат и сила нажима. Данные численно дифференцированы, сглажены и нормированы. Частота считывания координат – 200 Гц.

Таблица 1. Описание данных для оценки качества классификаторов

Номер набора данных	1	2
Название	Spoken Arabic Digit Data Set	Character Trajectories Data Set
Описание	Слова, произнесённые на арабском языке	Траектории рукописных букв английского алфавита
Количество классов	10	20
Размерность пространства признаков	13	3
Количество экземпляров каждого класса	880	100
Источник	Репозиторий UCI [17]	Репозиторий UCI [18]

Таблица 2. Параметры тестируемых классификаторов

Параметры классификаторов	HMM	HCRF	NPM-PGM
Метод инициализации	Первоначальная инициализация центров распределения вероятности в каждом состоянии производится алгоритмом $k$ -средних	Инициализация случайными значениями	Инициализация случайными значениями
Метод оптимизации	Алгоритм Баума-Велша	Квазиньютоновский алгоритм оптимизации – BFGS и метод сопряженных градиентов (CG)	Алгоритм, описанный в работе с использованием евклидовой метрики
Метод регуляризации	Без регуляризации	$L_2$ -регуляризация	Априорное распределение Дирихле

Оценка качества классификации проводилась в соответствии с методом  $k$ -блочной перекрёстной проверки (*k-fold cross-validation*), при которой размеченная выборка разбивается на  $k$  блоков:  $(k-1)$  блок используется для обучения и один блок используется для тестирования. Процедура выполняется итеративно для всех  $k$  блоков, результатом является средняя оценка качества на тестовом наборе по  $k$  блокам. Эксперименты проводились при значении  $k$  равном 10. В качестве меры оценки качества классификации используем сбалансированную F-меру с усреднением по всем классам (*macro-average F-measure*).

Оценка параметра  $L_2$ -регуляризации для модели HCRF, параметра распределения Дирихле для модели NPM-PGM, а также количества скрытых состояний для моделей HCRF и HMM и количества узлов аппроксимирующей сетки для модели NPM-PGM выполнялась на проверочной выборке, составляющей 10 % от тестовой. Значение параметра регуляризации  $\lambda$  было выбрано равным 1. Значение параметра распределения Дирихле  $\theta$  было выбрано равным 0.0001. В качестве функции  $p(\bar{x}_i | h_i)$  при обучении HMM выбрана конечная смесь гаус-

совских плотностей вероятности. Эксперименты проводились с одной и шестнадцатью компонентами смеси. В экспериментах использовалась двумерная квадратная карта Кохонена с гексагональной формой узлов с функцией соседства на основе вычисления евклидового расстояния между двумя узлами карты.

Результаты оценки качества классификации по методу  $k$ -блочной перекрёстной проверки приведены в таблице 3.

Выполним оценку качества классификации при малом количестве обучающих данных. Для этого обучение будем проводить на одном блоке, а тестирование на  $(k - 1)$  блоке. Результаты оценки качества классификации при малом количестве обучающих данных приведены в таблице 4.

Таблица 3. Результаты оценки качества классификации

	HMM (1 компонента)	HMM (16 компонент)	HCRF (BFGS)	HCRF (CG)	NPM-PGM
Spoken Arabic Digit Data Set (792 обучающих и 88 тестовых экземпляров каждого класса)					
Параметры	5 состояний	5 состояний	5 состояний	5 состояний	1024 узла
F-мера на обучающей выборке	0.9313	0.9722	0.9587	0.9353	0.9361
F-мера на тестовой выборке	0.8778	0.8368	0.9525	0.9344	0.9349
Переобучение	0.0535	0.1354	0.0062	0.0009	0.0012
Character Trajectories Data Set (90 обучающих и 10 тестовых экземпляров каждого класса)					
Параметры	7 состояний	7 состояний	7 состояний	7 состояний	256 узлов
F-мера на обучающей выборке	0.9568	0.9878	0.9960	0.9829	0.9999
F-мера на тестовой выборке	0.9329	0.9288	0.9651	0.9516	0.9809
Переобучение	0.0239	0.0590	0.0309	0,0313	0.0190

Таблица 4. Результаты оценки качества классификации при малом количестве обучающих данных

	HMM (1 компонента)	HMM (16 компонент)	HCRF (BFGS)	HCRF (CG)	NPM-PGM
Spoken Arabic Digit Data Set (88 обучающих и 792 тестовых экземпляров каждого класса)					
Параметры	5 состояний	5 состояний	5 состояний	5 состояний	1024 узла
F-мера на обучающей выборке	0.7421	1.0000	0.9977	0.9912	1.0000
F-мера на тестовой выборке	0.6018	0.5374	0.6420	0,6274	0.8043
Переобучение	0.1403	0.4626	0.3557	0,3638	0.1957
Character Trajectories Data Set (10 обучающих и 90 тестовых экземпляров каждого класса)					
Параметры	7 состояний	7 состояний	7 состояний	7 состояний	256 узлов
F-мера на обучающей выборке	0.9999	0.9952	1.0000	1.0000	1.0000
F-мера на тестовой выборке	0.7397	0.7243	0.6394	0.6053	0.8576
Переобучение	0.2602	0.2709	0.3606	0.3977	0.1424

В результате анализа оценки качества классификации можно отметить следующее:

- на всех используемых наборах данных предлагаемая порождающая графическая вероятностная модель (NPM-PGM) показала лучшее качество классификации, чем модель HMM, при оценке качества классификации по методу  $k$ -блочной перекрестной проверки при большом количестве обучающих данных;

- на одном из наборов данных (*Character Trajectories Data Set*) модель NPM-PGM показала лучшее качество классификации, чем модель HCRF, при оценке качества классификации по методу  $k$ -блочной перекрестной проверки при большом количестве обучающих данных;

- на всех используемых наборах данных модель NPM-PGM показала лучшее качество классификации, чем модели HMM и HCRF, при оценке качества классификации при малом количестве обучающих данных;

- количество узлов аппроксимирующей сетки значительно влияет на качество классификации и на эффект переобучения;
- модель НММ с шестнадцатью компонентами смеси показала худшее качество классификации, чем модель с одной компонентой в результате сильного переобучения, обусловленного возрастанием количества параметров модели;
- BFGS метод оптимизации, используемый при обучении HCRF, показал лучшее качество классификации, чем метод сопряженных градиентов. Это может быть объяснено спецификой работы алгоритмов на конкретных данных, а также наибольшей склонностью метода сопряженных градиентов, в отличие от BFGS, сходиться к локальным экстремумам. Целевая функция оптимизации модели HCRF является невыпуклой, что потребовало множества повторов выполнения процедуры обучения для получения результата близкого к глобально оптимальному.

Учитывая тот факт, что вычислительная сложность алгоритма «прямого-обратного хода» квадратично зависит от размера сетки, необходимо выбирать оптимальное количество узлов, так как с увеличением их числа время процедуры классификации путем вычисления выражения (3) будет квадратично расти, при этом приводя к незначительным увеличениям показателя F-меры.

К достоинствам предлагаемой модели следует отнести:

- возможность использования различных функций расстояния в зависимости от конкретных данных;
- высокое качество классификации при малом количестве обучающих данных.

К недостаткам предлагаемой модели следует отнести: сложность выбора оптимального количества узлов аппроксимирующей сетки, которое не приводит к переобучению и обеспечивает приемлемое качество классификации, а также значительно большее количество скрытых состояний, чем в моделях НММ и HCRF, что сказывается на увеличении времени выполнения классификации.

**7. Выводы и направления дальнейших исследований.** В данной работе предложена порождающая графическая вероятностная модель со скрытыми состояниями на основе главных многообразий для классификации временных последовательностей. Проведена сравнительная оценка качества классификации на различных наборах данных. Предлагаемая модель показала лучшие среди тестируемых моделей результаты классификации при обучении на малом количестве обучающих данных. Улучшение качества классификации по показате-

лю F-меры при тестировании методом  $k$ -блочной перекрёстной проверки при большом количестве обучающих данных составило:

- в сравнении с классификатором НММ – на 5.7 % на тестовом наборе 1, на 4.8 % на тестовом наборе 2;
- в сравнении с классификатором HCRF – на 1.6 % на тестовом наборе 2.

Используемый метод обучения модели направлен на увеличение правдоподобия модели для каждого класса своим обучающим данным. При таком подходе непосредственно сама дискриминантная способность модели не максимизируется. В дальнейшем предполагается улучшение данного метода за счет применения дискриминантного обучения с целью выбора оптимального количества узлов аппроксимирующей сетки, а также оптимального значения весовых векторов узлов.

### Литература

1. *Koller D., Friedman N.* Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques // USA: MIT Press. 2009. 1265 p.
2. *Рабинер Л.П.* Скрытые Марковские модели и их применение в избранных приложениях при распознавании речи: Обзор // ТИИЭР. 1989. Т. 77. № 2. С. 86–120.
3. *Gunawardana A., Mahajan M., Acero A., Platt J.C.* Hidden conditional random fields for phone classification. // International Conference on Speech Communication and Technology. 2005. pp. 1117–1120.
4. *Sutton C., McCallum A.* An Introduction to Conditional Random Fields for Relational Learning // USA: MIT Press, 2006. 35 p.
5. *Ng A., Jordan M.* On Discriminative vs. Generative Classifiers: A comparison of logistic regression and Naive Bayes // In Advances in Neural Information Processing Systems 14. 2002. pp. 841–848.
6. *Sung Y.-H., Boulis C., Manning C., Jurafsky D.* Regularization, adaption, and non-independent features improve hidden conditional random fields for phone classification // Automatic Speech Recognition & Understanding. Kyoto. 2007. pp. 347–352.
7. *Ширяев А. Н.* Вероятность: В 2-х кн. Кн. 1 // Москва: МЦНМО. 2007. 551 с.
8. *Кохонен Т.* Самоорганизующиеся карты // Москва: Бином. 2008. 655 с.
9. *Kurimo M.* Using Self-Organizing Maps and Learning Vector Quantization for Mixture Density Hidden Markov Models. Thesis for the degree of Doctor of Technology // Finland: Helsinki University of Technology. 1997.
10. *Somervuo P.* Competing Hidden Markov Models on the Self-Organizing Map // IJCNN. 2000. vol. 3. pp. 169–174.
11. *Calinon S., Billard A.* Recognition and Reproduction of Gestures using a Probabilistic Framework combining PCA, ICA and HMM // ICML. 2005. pp. 105–112.
12. *Neukirchen C., Rottland J., Willett D., Rigoll G.* A continuous density interpretation of discrete HMM systems and MMI-neural networks // IEEE Transactions on Speech and Audio Processing. 2001. vol. 9. Iss. 4. pp. 367–377.
13. *Osterndorf M., Rohlicek J. R.* Joint quantizer design and parameter estimation for discrete hidden Markov models // Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing. 1990. pp. 705–708.
14. *Маковкин К.А.* Гибридные модели: скрытые марковские модели и нейронные сети, их применение в системах распознавания речи // Модели, методы, алгоритмы

- ритмы и архитектуры систем распознавания речи. Москва: Вычислительный центр имени А.А. Дородницына, 2006. С. 40 – 96.
15. Горбань А. Н., Россиев А.А. Итерационное моделирование неполных данных с помощью многообразий малой размерности // *Нейрокомпьютеры*. 2002. Т. 4. С. 40–44.
  16. Gorban A., Kegl. B., Wunsch D., Zinovyev A. *Principal Manifolds for Data Visualisation and Dimension Reduction* // New York : Springer. 2008. 340 p.
  17. UCI Machine Learning Repository. Spoken Arabic Digit Data Set. URL: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Spoken+Arabic+Digit> (дата обращения: 12.05.2014).
  18. UCI Machine Learning Repository. Character Trajectories Data Set. URL: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Character+Trajectories> (дата обращения: 12.05.2014).

## References

1. Koller D., Friedman N. *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*. USA: MIT Press, 2009. 1265 p.
2. Rabiner, L. [A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition]. *TIJJeR – Proceedings of the IEEE*. 1989. vol. 77. no 2. pp. 86 – 120. (In Russ.).
3. Gunawardana A., Mahajan M., Acero A., Platt J.C. Hidden conditional random fields for phone classification. *International Conference on Speech Communication and Technology*. 2005. pp. 1117 – 1120.
4. Sutton C., McCallum A. *An Introduction to Conditional Random Fields for Relational Learning*. USA: MIT Press, 2006. 35 p.
5. Ng A., Jordan M. On Discriminative vs. Generative Classifiers: A comparison of logistic regression and Naive Bayes. In *Advances in Neural Information Processing Systems 14*. 2002. pp. 841– 848.
6. Sung Y.-H., Boullis C., Manning C., Jurafsky D. Regularization, adaption, and non-independent features improve hidden conditional random fields for phone classification. *Automatic Speech Recognition & Understanding*. Kyoto. 2007. pp. 347 – 352.
7. Shirjaev A.N. *Verojatnost' [Probability]*. Moscow: MCCME. 2007. 551 p. (In Russ.).
8. Kohonen T. *Samoorganizujushhiesja karty [The Self-Organizing Map]*. Moscow: Binom, 2008. 655 p. (In Russ.).
9. Kurimo M. *Using Self-Organizing Maps and Learning Vector Quantization for Mixture Density Hidden Markov Models*. Thesis for the degree of Doctor of Technology. Finland: Helsinki University of Technology. 1997.
10. Somervuo P. *Competing Hidden Markov Models on the Self-Organizing Map*. *IJCNN*. 2000. vol. 3. pp. 169 – 174.
11. Calinon S., Billard A. Recognition and Reproduction of Gestures using a Probabilistic Framework combining PCA, ICA and HMM. *ICML*. 2005. pp. 105 – 112.
12. Neukirchen C., Rottland J., Willett D., Rigoll G. A continuous density interpretation of discrete HMM systems and MMI-neural networks. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*. 2001. vol. 9. Iss. 4. pp. 367 – 377.
13. Osterndorf M., Rohlicek J. R. Joint quantizer design and parameter estimation for discrete hidden Markov models. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing*. 1990. pp. 705–708.
14. Makovkin K.A. [Hybrid models: the Hidden Markov Models and Neural Networks and their application in speech recognition systems]. *Modeli, metody, algoritmy i arhitektury sistem raspoznavanija rechi – Models, methods, algorithms and architec-*

- ture of speech recognition systems*. Moscow: Dorodnicyn Computing Centre of RAS. 2006. pp. 40 – 96. (In Russ.).
15. Gorban, A. N., Rossiev A.A. [Iterative modeling incomplete data using low-dimensional manifolds]. *Nejrokompj'utery – Neurocomputers*. 2002. vol. 4. pp. 40–44. (In Russ.).
  16. Gorban A., Kegl B., Wunsch D., Zinovyev A. *Principal Manifolds for Data Visualisation and Dimension Reduction*. New York: Springer. 2008. 340 p.
  17. UCI Machine Learning Repository. Spoken Arabic Digit Data Set. Available at: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Spoken+Arabic+Digit> (accessed 12.05.2014).
  18. UCI Machine Learning Repository. Character Trajectories Data Set. Available at: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Character+Trajectories> (accessed 12.05.2014).

**Паламарь Ирина Николаевна** — к-т техн. наук, доцент, профессор кафедры вычислительных систем Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьёва. Область научных интересов: теория анализа и распознавания изображений, речи, искусственные нейронные сети, теория искусственного интеллекта, системный анализ. Число научных публикаций — 57 и 23 запатентованных изобретений. [irina.palamar@mail.ru](mailto:irina.palamar@mail.ru); ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва» (РГАТУ имени П.А. Соловьёва), Пушкина ул., д. 53, Рыбинск, Ярославская обл., 152934, р.т. +7(4855) 21-97-16, факс +7 (4855) 21-39-64.

**Palamar Irina Nikolaevna** — Ph.D., associate professor, professor, Computing Systems Department, Faculty of Informatics and Radio Electronics, P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University (RSATU). Research interests: image analysis, image and speech recognition, artificial neural networks, artificial intelligence, system analysis. The number of publications — 57. The number of patented invention — 23. [irina.palamar@mail.ru](mailto:irina.palamar@mail.ru); Rybinsk State Aviation Technical University (RSATU), 53, Pushkin Str, Rybinsk, 152934, office phone +7(4855) 21-97-16, fax +7 (4855) 21-39-64.

**Юлин Сергей Сергеевич** — инженер-программист комплексного тематического отдела по работе с беспилотными летательными аппаратами ОАО «КБ «ЛУЧ». Область научных интересов: классификация временных последовательностей, графические вероятностные модели со скрытыми состояниями, алгоритмы поиска закономерностей в данных. Число научных публикаций — 6. [julin.serg@gmail.com](mailto:julin.serg@gmail.com); ОАО «КБ «ЛУЧ», б-р Победы, 25, Рыбинск, 152920, РФ; р.т. +7(4855)28-58-22, факс +7(4855)28-58-35.

**Yulin Sergey Sergeevich** — software engineer integrated thematic department on work with drones of Lutch, JSC. Research interests: sequence classification, probabilistic graphical model with hidden states, data mining. The number of publications — 6. [julin.serg@gmail.com](mailto:julin.serg@gmail.com); Lutch, JSC, 25, blvd. Pobedi, Rybinsk, 152920, Russia; office phone +7(4855)28-58-22, fax +7(4855)28-58-35.

## РЕФЕРАТ

### **Паламарь И.Н., Юлин С.С. Порождающая графическая вероятностная модель на основе главных многообразий.**

Графические вероятностные модели со скрытыми состояниями используются для решения задач классификации временных последовательностей. К таким задачам относятся: распознавание речи, рукописного текста, жестов рук или головы.

В данной работе предлагается графическая вероятностная модель на основе аппроксимации обучающих данных главными многообразиями малой размерности, заданными в виде сетки узлов. В качестве алгоритма построения сетки узлов используется алгоритм самоорганизующихся карт Кохонена. Нормированное от 0 до 1 расстояние от наблюдаемых данных до каждого узла сетки может являться аналогом вероятности появления наблюдаемых данных в скрытых состояниях и использоваться в алгоритмах вероятностного вывода на предлагаемой модели. За основу предлагаемой модели взята структура скрытой Марковской модели, которая представляет собой граф из двух типов вершин, соответствующих двум типам случайных величин (наблюдаемые и скрытые), и ребер между ними. Каждому скрытому состоянию соответствует узел аппроксимирующей сетки. Обучение модели производится итерационной процедурой, направленной на максимизацию правдоподобия. Вероятностный вывод с целью вычисления правдоподобия производится алгоритмом «прямого-обратного хода».

Предлагаемая в работе модель показала лучшие среди тестируемых моделей (НММ, HCRF) результаты классификации при обучении на малом количестве обучающих данных (менее 100 экземпляров каждого класса) на тестовых наборах «*Character Trajectories Data Set*» и «*Spoken Arabic Digit Data Set*» из репозитория UCI. Улучшение качества классификации по показателю F-меры при тестировании методом  $k$ -блочной перекрёстной проверки при большом количестве обучающих данных составило:

- в сравнении с классификатором НММ – на 5.7 % на тестовом наборе «*Spoken Arabic Digit Data Set*», на 4.8 % на тестовом наборе «*Character Trajectories Data Set*»;

- в сравнении с классификатором HCRF – на 1.6 % на тестовом наборе «*Character Trajectories Data Set*».

К достоинствам предлагаемой модели следует отнести: возможность использования различных функций расстояния в зависимости от конкретных данных и высокое качество классификации при малом количестве обучающих данных. К недостаткам предлагаемой модели следует отнести: сложность выбора оптимального количества узлов аппроксимирующей сетки, которое не приводит к переобучению и обеспечивает приемлемое качество классификации, а так же значительно большее количество скрытых состояний, чем в моделях НММ и HCRF, что сказывается на увеличении времени выполнения классификации.

## SUMMARY

### *Palamar I.N., Yulin S.S.* **Generative probabilistic graphical model base on the principal manifolds.**

Probabilistic graphical models with hidden states are used for sequences or time-series data classification. Sequences classification include: speech, handwriting and gestures classification.

In this paper we propose a probabilistic graphical model based on approximation of training data with principal manifolds of small dimension, given in the form of grid nodes. Kohonen's self-organizing map algorithm is used as an algorithm for constructing the grid nodes. Normalized from 0 to 1, the distance from the observed data to each node is considered as an analog of the probability of occurrence of the observed data in the hidden states and is used in probabilistic inference algorithms on the proposed model. The basis of the proposed model is taken Hidden Markov Model structure, which is a graph of the two types of nodes corresponding to two types of random values (observed and hidden), and edges between them. Each hidden node corresponds to a node of the approximating grid. Model's learning is performed by an iterative procedure directed to maximizing likelihood. Probabilistic inference to compute the likelihood is performed using «forward-backward» algorithm.

The proposed model showed better results than the HMM and HCRF at training on a small amount of training data (less than 100 copies of each class) on the test sets from the UCI repository: «Character Trajectories Data Set» and «Spoken Arabic Digit Data Set». Classification quality by F-measure by using the method k-folds cross-validation with a large number of training data improvement:

- compared with the HMM classifier was 5.7% on «Spoken Arabic Digit Data Set» and 4.8% on «Character Trajectories Data Set»;
- compared with the HCRF classifier was 1.6% on «Character Trajectories Data Set».

The advantages of the proposed model include: possibility of using different distance functions depending on the specific data; and high quality classification with a small amount of training data. The disadvantages of the proposed model include: the complexity of selecting the optimal number of the approximating grid nodes, which does not lead to overfitting and ensures a good quality of the classification, as well as considerably larger amount of hidden states needed comparing with HMM and HCRF classifiers which leads to longer classification runtimes.

О.О. БАСОВ, С.П. БОГДАНОВ, А.А. ИВАНОВ  
**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ГРАФОВ ДЛЯ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТАКТИЛЬНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ**

---

*Басов О.О., Богданов С.П., Иванов А.А.* **Применение методов теории графов для проектирования средств измерения тактильных параметров.**

**Аннотация.** Рассмотрен подход к проектированию оптимальной структуры многофункционального беспроводного средства измерения тактильных параметров с автономным питанием на основе поиска кратчайших путей на графе, весам которого поставлен в соответствие обобщенный показатель, учитывающий энергопотребление, стоимость и техническую совместимость функциональных узлов. Приведен пример повышения точности оценки измеряемых параметров функционального состояния человека при использовании комбинированных беспроводных средств измерений.

**Ключевые слова:** полимодальная инфокоммуникационная система, беспроводные средства контроля, энергетическая избыточность.

*Basov O.O., Bogdanov S.P., Ivanov A.A.* **Graph theory practice for tactile characteristics measuring means design.**

**Abstract.** Design approach to the optimal structure of multifunctional wireless tactile measuring means with self-contained power supply based on the search of the shortest paths in the graph, the balance of which is mapped to composite index that takes into account energy consumption, cost and technical compatibility of the functional units is considered. An example of increasing the accuracy of estimates of the measured parameters of objects with the combined wireless measuring tools is provided.

**Keywords:** polymodal infocommunication system, wireless control, energy duplication.

---

**1. Введение.** Новой парадигмой в области телекоммуникационных и информационных технологий являются полимодальные инфокоммуникационные системы (ПИКС) [1]. Отказ в последних от традиционных принципов разделения передаваемой информации на услуги в пользу ее полимодального представления позволяет обеспечить перцептивную сторону общения (познание друг друга партнерами по общению), а их дальнейшая интеллектуализация – приблизить инфокоммуникационное взаимодействие абонентов к традиционному межличностному общению.

Полимодальные системы выделяют, обрабатывают и представляют информацию от различных каналов коммуникации человека. И если в настоящее время средства ввода и обработки сигналов текстового, акустического и визуального каналов достаточно развиты, а анализу запахов (ольфакторный канал) препятствует развитие чувствительных элементов средств измерения, то реализация последних для тактильного канала коммуникации является вполне выполнимой задачей.

**2. Постановка задачи измерения тактильных параметров человека.** Для эффективной реализации идентификации в ПИКС, мониторинга активности, определения физиологического и психоэмоционального состояний и прогнозирования намерений абонентов ключевыми параметрами являются температура и влажность их рук, а также создаваемое ими давление на органы управления полимодальными интерфейсами и элементы рабочего места. Очевидно, что измерение указанных параметров должно осуществляться скрытно и ненавязчиво для человека, концентрируя его внимание на выполняемой задаче, а соответствующие средства измерения учитывать многообразие возможных манипуляций абонента с элементами рабочего места (в том числе с органами управления абонентским терминалом ПИКС) и их взаимоположений.

Благодаря развитию полупроводниковой и оптоэлектронной элементной базы, миниатюризации интегральных микросхем и появлению новых технологий передачи в указанных выше ограничениях рациональным является применение беспроводных средств измерений (БСИ), при этом малоисследованным направлением развития последних является увеличение времени их работы средств без замены источников автономного электропитания.

Таким образом, измерение тактильных параметров человека в ПИКС является актуальной научно-технической задачей, решение которой может быть получено на основе применения БСИ при условии снижения их энергетической избыточности без ухудшения основных технических характеристик. Под энергетической избыточностью следует понимать ту часть потребляемой электрической мощности, которая не идет на выполнение основных заданных функций, выполняемой средством измерения.

**3. Моделирование беспроводных средств измерений с пониженным энергопотреблением.** Учитывая монотонность измеряемых тактильных параметров, появляется возможность их периодического измерения. С учетом этого для снижения структурной избыточности предлагается использовать одни и те же однотипные структурные элементы совмещенного БСИ в функциональных схемах нескольких разнотипных преобразователей, осуществляя их последовательную коммутацию.

Обобщенную структурную схему средства можно представить с помощью графа (рис. 1), у которого вершины соответствуют множеству структурных элементов средства, а ребра – связям между ними с учетом значений коэффициентов технической совместимости, определяющих соответствие двух сопрягаемых электронных

элементов ( $j$ -го и  $(j-1)$ -го блоков) по ряду важных характеристик (напряжению питания, точности, чувствительности, разрядности), сложности монтажа и т. д., которые находятся экспертным путем в диапазоне  $T_{ij} \in (0; 1]$ . Они могут быть определены на основе метода непосредственных экспертных оценок и присвоены весам ветвей (узлов).

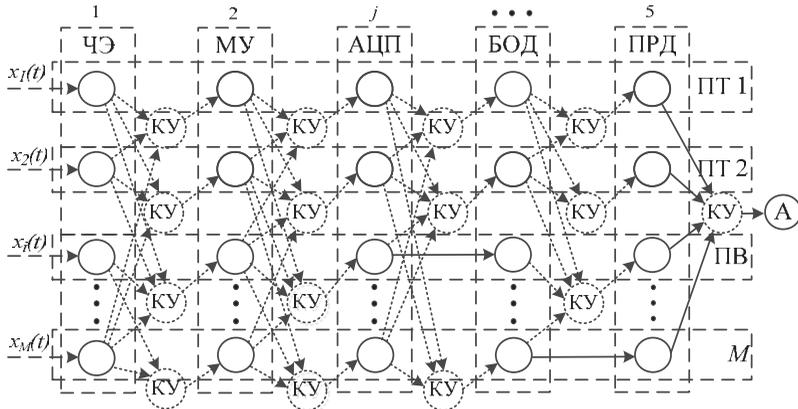


Рис. 1. Граф типовой структуры комбинированного (совмещенного) БСИ: ЧЭ – чувствительный элемент; МУ – масштабирующий усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; КУ – коммутационный узел; БОД – блок обработки данных; ПРД – передатчик; А – антенна; ПТ – преобразователь температуры; ПВ – преобразователь влажности; М – преобразователь  $M$ -го параметра

Наряду с коэффициентом технической совместимости  $T_{ij}$  при оптимизации структуры средства необходимо учитывать: энергопотребление  $E_{ij}$  отдельных электронных элементов и их стоимость  $S_{ij}$ .

Обобщенный показатель, характеризующий вес ветви (узла) графа может быть рассчитан следующим образом:

$$k_{ij} = \frac{E_{ij}^{\text{норм}} \cdot S_{ij}^{\text{норм}}}{T_{ij}}, \quad (1)$$

где  $j$  – номер блоков в структуре средства ( $j=1...5$ );  $i$  – номер структурного элемента в  $j$ -м блоке (группе элементов) ( $i=1...M$ );

$M$  – максимальное число структурных элементов одного типа блоков (группы элементов);  $E_{ij}^{\text{норм}}$ ,  $S_{ij}^{\text{норм}}$  – нормированные значения энергопотребления и стоимости  $i$ -го элемента  $j$ -го блока соответственно;  $k_{ij}$  – вес ребра к  $i$ -му элементу  $j$ -го блока.

**4. Синтез структур средств измерения тактильных параметров.** Минимизация обобщенного показателя (1):

$$l_{ij} \leftarrow \min(k_{ij} + l_{i(j-1)}), \quad (2)$$

где  $l_{ij}$  – сумма весов обобщенных показателей на маршруте от последнего узла ( $A$ ) ко всем первым, позволяет на основе алгоритма Дейкстры оптимизировать структуру БСИ с учетом требований по энергопотреблению, стоимости и коэффициента технической совместимости. При необходимости функциональная (структурная) схема средства измерения может быть представлена с большей степенью детализации (большим числом узлов), техническая совместимость формализована в виде отдельных параметров, а обобщенный показатель (1) расширен другими техническими характеристиками элементов. Использование такого технического решения позволяет унифицировать процесс разработки БСИ различного функционального назначения и сократить экономические затраты на их производство.

Для оптимизации структуры БСИ проведена модификация алгоритма Дейкстры (рис. 2) [2]. Исходными данными для его работы являются: матрица весов вершин  $K = \{k_{ij}\}$ , где  $k_{ij}$  – значения обобщенного показателя (1); и  $Y = \{y_{ijz}\}$  – матрица смежности, где  $y_{ijz}$  – принимает значения 0 (связь отсутствует) или 1 (связь есть) между вершинами шагов  $j$  и  $(j-1)$ ,  $i$  и  $z$  порядковые номера узлов на шагах.

К основным этапам функционирования алгоритма оптимизации относятся:

I – получение матрицы маршрутов  $Tr = \{Tr_{ij}\}$ , обеспечивающих минимальные значения весов пути для всех вершин графа;

II – восстановление массива оптимальных маршрутов  $Op = \{Op_{ij}\}$ ;

III – удаление узлов графа, соответствующих КУ с одним входом;

IV – формирование матрицы коммутаций  $Mk = \{Mk_{ij}\}$ , определяющей режимы работы коммутационных узлов.

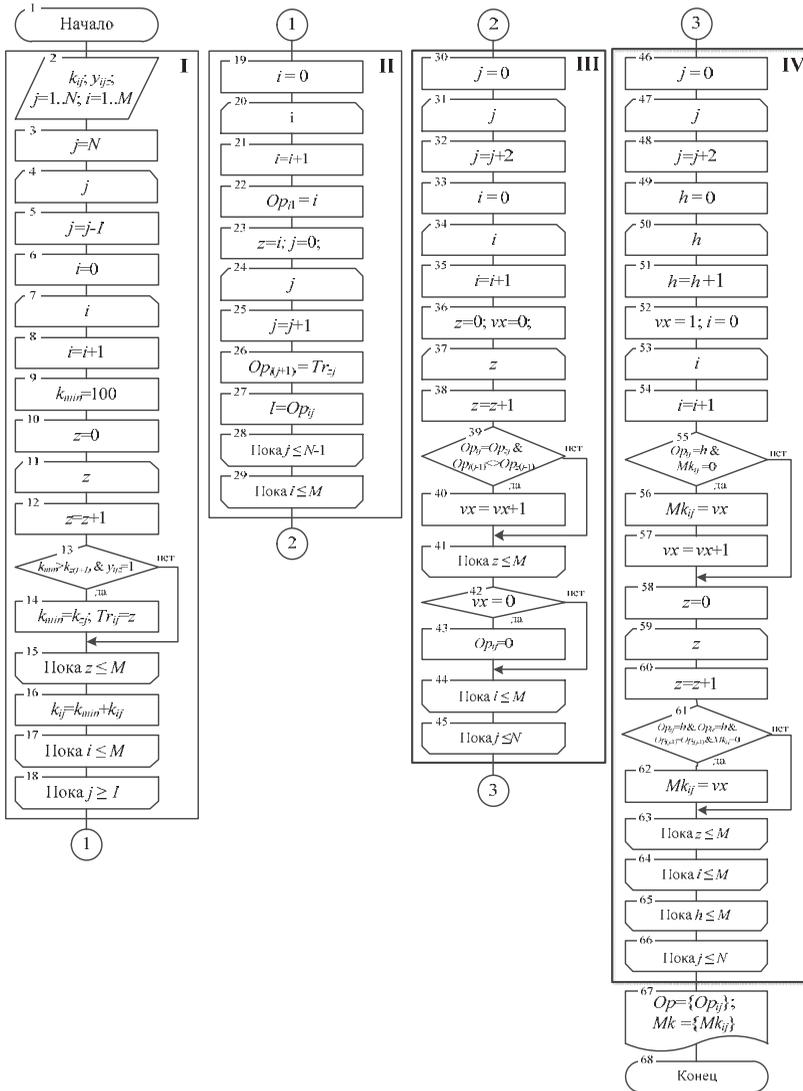


Рис. 2. Алгоритм оптимизации структуры комбинированного БСИ

Первые два этапа соответствуют выполнению классического алгоритма поиска кратчайших путей (алгоритм Дейкстры), а реализация третьего позволяет получить оптимальные маршруты, не содержащие КУ с одним входом, на четвертом – формируется матрица коммутаций, в соответствии с которой определяется таблица динамической адресации КУ.

Практическое использование разработанного алгоритма [3] позволяет снизить структурную избыточность совмещенных и комбинированных БСИ с автономным электропитанием.

### **5. Повышение точности измерения тактильных параметров.**

Отдельного анализа требует оценка точности измерений параметров полученных комбинированным БСИ, которую можно оценить на примере рассмотрения характеристик температурного датчика.

Пусть  $T$  – действительное значение температуры, которую следует оценить, используя множество измерений  $x_i$  ( $i=1..n$ ), поступающих от разных чувствительных элементов. Тогда измеренное значение можно представить в виде:

$$x_i = T + \xi_i, \quad (3)$$

где  $\xi_i$  – различного рода систематические и случайные погрешности, сопутствующие измерениям.

Основными источниками погрешностей датчиков температуры являются [4]:

- нелинейность функции преобразования;
- погрешности квантования выходного сигнала, если в устройстве осуществляется его аналого-цифровое преобразование;
- технологические отклонения конструктивных параметров чувствительных элементов от их номинальных значений;
- неточность калибровки датчиков температуры;
- воздействие факторов окружающей среды.

Оценку  $\hat{T}$  измеряемой температуры  $t$  по имеющемуся множеству  $x_i$  можно описать в виде их линейной комбинации:

$$\hat{T} = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n = \sum_{i=1}^n a_ix_i, \quad (4)$$

где  $a_i$  – коэффициенты, характеризующие вес каждого измерения в формировании оценки. Значение коэффициентов  $a_i$  выбираются с учетом стандартных требований к оценке – несмещенности, состоятельности и эффективности.

Несмещенность оценки означает отсутствие систематических погрешностей в измеренных данных, для этого ее математическое ожидание должно быть равно оцениваемому параметру.

Состоятельность заключается в том, что с ростом числа измерений дисперсия стремится к нулю. Для измеряемого параметра оценка эффективна, если имеет минимальную дисперсию. Учитывая это [5], значения коэффициентов:

$$a_i = \frac{1}{d_i} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j}, \quad (5)$$

где  $d_i$  – дисперсия погрешности в соответствующем измерении, т. е. вес каждого измерения  $x_i$  в результирующей оценке  $\hat{T}$  тем больше, чем меньше дисперсия погрешности, то есть чем точнее измерение.

Дисперсия ошибки оценки  $d(\hat{T})$  может быть вычислена посредством следующего отношения:

$$\frac{1}{d(\hat{T})} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что результирующая дисперсия оценки температуры будет всегда меньше дисперсии погрешности в любом измерении. Это означает, что даже информация от неточного (грубого) датчика улучшит качество оценивания параметра. Докажем это утверждение на примере.

### 6. Пример повышения точности измерения температуры.

Допустим, что поступила информация от трех датчиков температуры: точного с дисперсией  $d_1 = 1$ , средней точности с  $d_2 = 10$  и грубого с  $d_3 = 100$ .

Вес каждого измерения в соответствии с выражением (5):

$$a_1 = \frac{1}{1+0,1+0,01} = \frac{1}{1,11}; \quad a_2 = \frac{1}{11,1}; \quad a_3 = \frac{1}{111}.$$

Тогда оценку температуры можно представить следующим образом:

$$\hat{T} = \frac{1}{1,11}x_1 + \frac{1}{11,1}x_2 + \frac{1}{111}x_3,$$

т.е. видно, что вклад грубого датчика мал.

Дисперсия ошибки оценки определяется через выражение, как  $\frac{1}{d(\hat{T})} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}$  или  $d(\hat{T}) = \frac{d_1 d_2 d_3}{d_2 d_3 + d_1 d_3 + d_1 d_2}$  и равна  $d(\hat{T}) = \frac{1000}{1000+100+10} \approx 0,9009$ .

Сравнивая дисперсии ошибок оценок одного точного датчика ( $d(\hat{r})_1 = 1$ ) и трех, разной точности ( $d(\hat{r}) = 0,9009$ ), можно сделать вывод, что точность оценки можно улучшить (в приведенном примере на 10%), если, учитывая информацию, поступающую от нескольких даже неточных датчиков.

Поскольку точность оценки (характеризуется дисперсией ошибки оценки) по данным от нескольких датчиков всегда выше точности от каждого из измерений, то для повышения точности оценки измеряемых параметров целесообразно использовать комбинированные БСИ.

**7. Заключение.** Приведенные в работе данные позволяют сделать следующие выводы:

1) структура БСИ тактильных параметров может быть представлена в виде графа, у которого вершины соответствуют множеству функциональных узлов, ребра – связям между ними, а весам вершин (ребер) поставлены в соответствие значения введенного обобщенного показателя;

2) синтез совмещенных и комбинированных БСИ может быть осуществлен на основе разработанного алгоритма поиска кратчайших путей, дополненного процедурами удаления незадействованных функциональных узлов и формирования сигналов управления применяемыми коммутационными узлами;

3) для повышения точности оценки измеряемых тактильных параметров целесообразно использовать комбинированные БСИ, синтезированные по разработанному алгоритму.

Таким образом, применение методов теории графов позволяет синтезировать структуры БСИ тактильных параметров человека по критерию минимума обобщенного показателя, учитывающего энергопотребление, стоимость, техническую совместимость элементной базы.

## Литература

1. *Басов О.О., Саитов И.А.* Основные каналы межличностной коммуникации и их проекция на инфокоммуникационные системы // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 7(30). С. 122–140.
2. *Кристофидес Н.* Теория графов. Алгоритмический подход / пер. с англ. // М.: Мир. 1978. 432 с.
3. *Басов О.О., Богданов С.П., Гуляйкин Д.А.* Программа оптимизации структуры цифрового устройства // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616099 от 26.06.2013.
4. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений / 2-е изд., перераб. и доп. // Л.: Энергоатомиздат. 1991. 304 с.
5. *Зенкевич С.Л., Назаров А.В.* Оценка параметра по информации от нескольких датчиков // Механика, автоматизация, управление. 2010. № 9. С. 71–73.

## References

1. Basov O.O., Saitov I.A. [The main channels of interpersonal communication and their projection on the infocommunication systems]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. no. 7(30). pp. 122–140. (In Russ.).
2. Christofides N. Graph theory. An algorithmic approach. New York, Academic Press, 1975. (Russ. ed.: Kristofides N. Teoriia grafov. Algoritmicheskii podkhod. Moscow, Mir, 1978. 432 p.).
3. Basov O.O., Bogdanov S.P., Guljajkin D.A. *Programma optimizacii struktury cifrovogo ustrojstva* [Program of optimization of structure of digital devices]. Patent RF. no. 2013616099, 26.06.2013. (In Russ.).
4. Novickij P.V., Zograf I.A. *Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij. 2-e izd., pererab. i dop* [Estimation of errors of measurement results. 2nd ed., rev. and add.]. L.: Jenergoatomizdat, 1991. p. 304. (In Russ.).
5. Zenkevich S.L., Nazarov A.V. [Parameter estimate on information from multiple sensors]. *Mehanika, avtomatizacija, upravlenie – Mechanics, automation, control*. 2010. no. 9. pp. 71–73. (In Russ.).

**Басов Олег Олегович** — к-т техн. наук, докторант Академии ФСО России. Область научных интересов: обработка и кодирование речевых и иконических сигналов, проектирование полимодальных инфокоммуникационных систем. Число научных публикаций — 142. oobasov@mail.ru; Академия ФСО России, Приборостроительная, 35, г. Орел, 302034, РФ; р.т. +79192011897.

**Basov Oleg Olegovich** — Ph.D., doctoral, Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation. Research interests: processing and coding of speech and iconic signals, polymodal infocommunicational systems design. The number of scientific publications — 142. oobasov@mail.ru; Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation, Pribrorostroitelnaya Street, 35, Orel, 302034, Russia, office phone +79192011897.

**Богданов Сергей Петрович** — к-т техн. наук., преподаватель Академии ФСО России. Область научных интересов: анализ и синтез беспроводных радиотехнический устройств. Число научных публикаций — 40. spbogdanov@mail.ru; Академия ФСО России, Приборостроительная, 35, г. Орел, 302034, РФ; р.т. +79103027620.

**Bogdanov Sergey Petrovich** — Ph.D., teacher, Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation. Research interests: analysis and synthesis of wireless devices. The number of publications — 40. spbogdanov@mail.ru; Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation, Pribrorostroitelnaya Street, 35, Orel, 302034, Russia, office phone +79103027620.

**Иванов Александр Анатольевич** — инженер Академии ФСО России. Область научных интересов: анализ и синтез радиотехнический устройств и систем. Число научных публикаций — 3. Nms-orel-23@yandex.ru; Академия ФСО России, Приборостроительная, 35, г. Орел, 302034, РФ; р.т. +79051656250.

**Ivanov Aleksandr Anatol'evich** — engineer, Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation. Research interests: analysis and synthesis of wireless devices. The number of publications — 3. Nms-orel-23@mail.ru; Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation, Pribrorostroitelnaya Street, 35, Orel, 302034, Russia, office phone +79051656250.

## РЕФЕРАТ

### **Басов О.О., Богданов С.П., Иванов А.А. Применение методов теории графов для проектирования средств измерения тактильных параметров.**

Для эффективной реализации идентификации в полимодальных инфокоммуникационных системах, мониторинга активности, определения психофизиологического состояния и прогнозирования намерений абонентов применяются автономные беспроводные средства измерения тактильных параметров. Одной из задач, на решение которой направлены усилия разработчиков беспроводных средств измерений, является увеличение времени их работы без замены источников автономного электропитания. Данная задача может быть решена путем снижения их энергетической избыточности без ухудшения основных технических характеристик.

Во втором разделе статьи предложен подход к формированию структурных схем совмещенных беспроводных средств измерений на основе теории графов. Определен обобщенный показатель, характеризующий вес ветви (узла) графа, учитывающий энергопотребление, стоимость и техническую совместимость отдельных элементов средства.

В третьем разделе авторами предложен модифицированный алгоритм Дейкстры, позволяющий синтезировать оптимальную структуру совмещенного беспроводного средства измерения. Особенностью данного алгоритма заключается в исключении коммутирующих узлов, содержащих один вход и формировании матрицы коммутации, в соответствии с которой определяется таблица динамической адресации задействованных коммутационных узлов. Практическое использование разработанного алгоритма позволяет снизить структурную избыточность совмещенных средств измерений с автономным электропитанием.

В четвертом разделе представлен анализ оценки точности измерений тактильных параметров, синтезированных по разработанному алгоритму комбинированных средств измерений. Математически доказано, что точность оценки (характеризуется дисперсией ошибки оценки) по данным от нескольких датчиков всегда выше точности от каждого из измерений, следовательно, для повышения точности оценки измеряемых тактильных параметров целесообразно использовать комбинированные беспроводные средства измерения.

Таким образом, авторами доказано, что применение методов теории графов позволяет синтезировать структуры совмещенных беспроводных средств измерений тактильных параметров человека по критерию минимума обобщенного показателя, учитывающего энергопотребление, стоимость, техническую совместимость элементной базы, а для комбинированных беспроводных средств измерений еще и повысить точность оценки измеряемых параметров.

## SUMMARY

### *Basov O.O., Bogdanov S.P., Ivanov A.A.* **Graph theory practice for tactile characteristics measuring means design.**

For effective implementation of identification in polymodal infocommunication systems, activity monitoring, psychophysiological state determination and subscribers' intentions predict stand-alone wireless measuring tactile parameters are used. One of the problems solved by the developers' efforts of wireless measuring instruments is the increasing the time of their work without replacement of independent power sources. This problem can be solved by reducing the redundancy of their energy without the main technical characteristics degradation.

In the second section of the paper an approach to the formation of structural combined wireless measuring instruments schemes based on graph theory is proposed. A generalized graph (node) edge' weight index which takes into account energy consumption, cost, and technical compatibility of individual means elements is defined.

In the third section, a modified Deijkstra algorithm, which allows to synthesize the optimal structure of the combined wireless measuring instrument is proposed. A feature of this algorithm is in exception the commuting nodes that contain one input and switching matrix formation, in accordance with the table which defines dynamic addressing, switching nodes is involved. Practical use of the developed algorithm can reduce the structural redundancy of measuring combined with an autonomous power supply.

In the fourth section the accuracy of measurements of tactile evaluation parameters analysis synthesized by means of the developed algorithm measurements combined is represented. Mathematically proved that the accuracy of estimation (is characterized by estimation error dispersion) according to data from several sensors is always higher than the accuracy of each measurement is therefore to improve the estimation accuracy of the measured parameters is appropriate to use tactile combined wireless measuring means.

Thus, the authors proved that the graph theory application allows one to synthesize combined wireless parameters of measuring tactile person's structures by a minimum overall index, which takes into account energy consumption, cost, technical compatibility element base, and for combined wireless measuring instruments also improve the accuracy of estimates of the measured parameters.



Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Труды СПИИРАН» <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. При регистрации авторам рекомендуется заполнить все предложенные поля данных, так как это значительно ускорит процесс оформления метаданных к новым статьям.

Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше. При подаче материала в редакцию сначала отправляется только статья в формате \*.docx. Для обеспечения требований слепого рецензирования при представлении статьи в журнал авторам необходимо удалить персональные данные, содержащиеся в тексте файла и его свойствах.

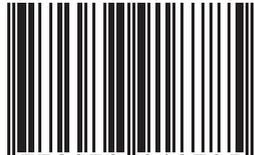
Объем основного текста – от 5 до 20 страниц включительно. Формат страницы документа – А5 (148 мм ширина, 210 мм высота); ориентация – портретная; все поля – 20 мм. Верхний и нижний колонтитулы страницы – пустые. Основной шрифт документа – Times New Roman, основной кегль (размер) шрифта – 10 pt. Переносы разрешены. Абзацный отступ устанавливается размером в 10 мм. Межстрочный интервал – одинарный. Номера страниц не проставляются.

Не допускается использования цветных шрифтов, цветовых выделений и цветных рисунков. Статьи должны быть полностью готовы к черно-белой печати.

Основная часть текста статьи разбивается на разделы, среди которых являются обязательными: введение, хотя бы один «содержательный» раздел и заключение. Допускается также мотивированное содержанием и структурой материала выделение подразделов.

В основную часть допускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

ISSN 2078-9181



9 772078 918785 >