

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 25

2019

№ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС

Рисунки к статье В. В. Грибовой, Ф. М. Москаленко,
К. И. Шахгельдян, Д.В. Гмаря, Б.И. Гельцера

«КОНЦЕПЦИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ХРАНИЛИЩА БИМЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИИ»

▼ > База знаний о диагностике заболеваний и синдромов 2018 [Онтология знаний о диагностике заболеваний]   

gribova@iacr.dvo.ru/Мой Фонд/Медицина/Базы заболеваний/База знаний о диагностике заболеваний и синдромов 2018

▼ ЗАБОЛЕВАНИЯ

- ▶ БОЛЕЗНИ ОРГАНОВ ПИЩЕВАРЕНИЯ * [Группа заболеваний (или Подгруппа)]  
- ▶ ИНФЕКЦИОННЫЕ И ПАРАЗИТАРНЫЕ БОЛЕЗНИ [Группа заболеваний (или Подгруппа)]    
- ▶ БОЛЕЗНИ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ [Группа заболеваний (или Подгруппа)]    
- ▶ БОЛЕЗНИ СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ [Группа заболеваний (или Подгруппа)]    
- ▶ БОЛЕЗНИ МОЧЕПОЛОВОЙ СИСТЕМЫ [Группа заболеваний (или Подгруппа)]    
- ▶ БОЛЕЗНИ ЭНДОКРИННОЙ СИСТЕМЫ И НАРУШЕНИЯ ОБМЕНА ВЕЩЕСТВ [Группа заболеваний (или Подгруппа)]

Рис. 3. Группы заболеваний, доступные для диагностики (скриншот)

▼ ГЛПС * [Заболевание]    

▼ Симптомкомплекс (основной) * [Симптомкомплекс]    

- ▶ Комплекс жалоб и объективного обследования  
- ▼ Комплекс лабораторных и инструментальных исследований    
- ▼ Показатели крови [Исследование лабораторное или инструментальное]    
- ▶ Биохимический анализ крови [Вид (метод) исследования]  
- ▶ Клинический анализ крови [Вид (метод) исследования]  
- [Вид (метод) исследования]  
- ▼ Анализ мочи [Исследование лабораторное или инструментальное]    
- ▶ ↑ Биохимическое исследование мочи [Вид (метод) исследования]  
- ▶ Общий анализ мочи [Вид (метод) исследования]  
- [Вид (метод) исследования]  
- ▼ УЗИ почек [Исследование лабораторное или инструментальное]    
- ▶ Исследование почек [Вид (метод) исследования]
- [Вид (метод) исследования]  
- ▼ Серологические исследования на вирусные заболевания (вирусологические исследования) лабораторное или инструментальное]    
- ▶ Непрямой метод флюоресцирующих антител [Вид (метод) исследования]
- [Вид (метод) исследования]  
- [Исследование лабораторное или инструментальное]  
- [Необходимое условие]  
- [Синдром или Патологическое состояние] 
- ▶ Симптомкомплекс 512 [Симптомкомплекс]    
- ▶ Симптомкомплекс 4-х кратный [Симптомкомплекс]    
- ▶ Симптомкомплекс абдоминальный [Симптомкомплекс по периодам]    
- ▼ Детализация диагноза    
- ▼ По варианту  
- ▼ Амур-инфекция [элемент диагноза]  

Рис. 4. Фрагмент базы знаний по диагностике ГЛПС (скриншот)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 25
2019
№ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Жевнерчук Д. В. Обобщенный метод синтеза многокомпонентных интероперабельных структур на основе онтологии и недетерминированного конечного автомата 67

Трубочкина Н. К., Поляков С. К. Система электронного голосования на основе технологии блокчейн с использованием смарт-контракта 75

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Касаткин С. С., Калайда В. Т. Метод и реализация системы формализации описания класса изображений методами непараметрической статистики . 86

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В БИМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ

Грибова В. В., Москаленко Ф. М., Шахгельдян К. И., Гмарь Д. В., Гельцер Б. И. Концепция гетерогенного хранилища биомедицинской информации 97

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Барский А. Б., Мельник Д. И., Решетников А. В. Нейросетевые методы управления качеством при модернизации и развитии сложных систем в условиях финансовых и технологических ограничений 107

Амосов О. С., Амосова С. Г., Иванов Ю. С., Жиганов С. В. Моделирование интеллектуальной системы контроля и управления доступом транспортных средств с использованием глубоких нейронных сетей 116

Главный редактор:

СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:

ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:

БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.
ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.

КУЛЕШОВ А. П.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

ПОПКОВ Ю. С.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

РУСАКОВ С. Г.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

РЯБОВ Г. Г.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

СОЙФЕР В. А.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

СОКОЛОВ И. А.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.

ЧАПЛЫГИН Ю. А.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

ШАХНОВ В. А.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

ШОКИН Ю. И.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

ЮСУПОВ Р. М.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:

АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.

АНТОНОВ Б. И.

БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.

ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.

ВАСИЛЬЕВ В. И., д. т. н., проф.

ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.

ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.

ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.

ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.

ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.

КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.

КОЛИН К. К., д. т. н., проф.

КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.

КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.

ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.

МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.

МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.

НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.

ПОЛЕЩУК О. М., д. т. н., проф.

САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.

СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.

ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.

УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)

ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.

ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

INFORMATION TECHNOLOGIES

INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 25
2019
No. 2

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

CONTENTS

NEW INFORMATION TECHNOLOGIES

Zhevnerchuk D. V. A Generalized Method for Synthesizing Multicomponent Interoperable Structures Based on Ontology and a Nondeterministic Finite State Machine 67

Trubochkina N. K., Poliakov S. K. The Concept of Electronic Voting Based on Blockchain 75

DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

Kasatkin S. S., Kalaida V. T. Method and Implementation of the Formalization System for Describing the Class of Images using Nonparametric Statistics 86

INFORMATION SYSTEMS IN BIOMEDICAL SYSTEMS

Gribova V. V., Moskalenko Ph. M., Shahgeldyan C. I., Gmar' D. V., Geltser B. I. A Concept for a Heterogeneous Biomedical Information Warehouse 97

NEUROTECHNOLOGIES

Barsky A. B., Melnik D. I., Reshetnikov A. V. Neural Network Methods of Quality Management during the Modernization and Development of Complex Systems in the Context of Financial and Technological Constraints 107

Amosov O. S., Amosova S. G., Ivanov Y. S., Zhiganov S. V. Modelling of Intelligent Access Monitoring and Control System for Vehicles with Using the Deep Neural Networks 116

Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kuleshov A. P., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Popkov Yu. S., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Soifer V. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov I. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Suetin N. V.,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Chaplygin Yu. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shokin Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Antonov B. I.
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Vasiliev V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kureichik V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Martynov V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Saksonov E. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

Editors:

Bezmenova M. Yu.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

Д. В. Жевнерчук, канд. техн. наук, доц., e-mail: zhevnerchuk@yandex.ru,
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Обобщенный метод синтеза многокомпонентных интероперабельных структур на основе онтологии и недетерминированного конечного автомата

Обсуждается проблема синтеза многокомпонентных интероперабельных структур (МИС), которая относится к классу задач структурно-параметрического синтеза открытых информационных систем. Предложен обобщенный метод синтеза МИС, основанный на онтологическом представлении стандартизированных компонентов, их интерфейсов и формируемых многокомпонентных структур. Показано, что синтез МИС может быть сведен к задаче управления взаимодействующими процессами для организации распределенной обработки онтологии как разделяемого, распределенного ресурса. Предложена система событий, представленная в виде недетерминированного автомата, позволяющая формализовать и реализовать алгоритмы управления многопроцессной системой синтеза МИС.

Ключевые слова: открытая информационная система, компонент, интерфейс, многокомпонентная структура, интероперабельность, структурно-параметрический синтез, недетерминированный конечный автомат, распределенный алгоритм

Введение

В настоящее время все большее значение в области информационных технологий приобретает проблема автоматизации построения открытых информационных систем (ОИС), компоненты которых способны к взаимодействию, основанному на использовании информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) [1]. Сам процесс построения ОИС сильно децентрализован и осуществляется независимыми группами технических специалистов, круг возможных специализаций которых достаточно широк, а именно: стандартизированные модели архитектурных решений; стандартизированные модели информационных процессов; стандартизированные интерфейсы и протоколы; стандартизированные модули (компоненты); интероперабельные, масштабируемые информационные системы.

Самым ярким примером открытой информационной системы является сеть Интернет, совмещающая большое число спецификаций, курируемых рабочими группами IETF, W3C и др. [1–3]. Разработчики решений для сети Ин-

тернет ориентируются на круг утвержденных нормативных документов и предлагают свои аппаратные/программные решения, поддерживающие стандартизированные интерфейсы и протоколы, а следовательно, обладающие необходимым уровнем интероперабельности для выполнения своих функций совместно с существующими компонентами сети. Поскольку для сети Интернет решения могут быть предложены любой командой, то имеет смысл говорить о группах разработчиков, географически распределенных по всей планете. Остается множество вопросов, связанных с инфокоммуникационной средой разработчиков, предоставляющей им необходимые минимальные сведения для эффективного участия в развитии сети Интернет, т. е. непосредственно касающихся автоматизации предпроектной, проектной деятельности.

При проектировании и разработке ОИС независимо от задач и областей применения все компоненты должны обладать стандартизированными интерфейсами и поддерживать стандартизированные протоколы взаимодействия. Информация о них размещается в справоч-

никах и справочных системах, которые, как правило, представляют собой варианты информационно-поисковых систем с модулями и интеграции в САПР или пакеты моделирования [4—6]. Такие системы эффективно используются в корпоративных разработках, не требующих аналитических обзоров, патентного поиска и поиска готовых встраиваемых решений и т. д.

Таким образом, можно констатировать факт отсутствия единых информационных пространств и коммуникационных сред, которые бы обеспечивали независимый ввод данных о компонентах и их свойствах, а также методах обеспечения их валидности в смысле соответствия известным спецификациям.

Другой стороной проблемы является отсутствие эффективных моделей и алгоритмов синтеза многокомпонентных структур на основе стандартизированных интерфейсов, поддерживающих информационные процессы.

Известна группа комбинаторно-логических методов структурного синтеза, которая ориентирована на решение задачи компонентной сборки технических систем. В основе этого подхода лежит хорошо организованный перебор в массиве решений, которые являются аналогами и прототипами.

Метод морфологического синтеза [7, 8], предложенный Ф. Цвикки, позволяет найти и систематизировать все возможные способы построения объекта, имеющие данное функциональное назначение. Для описания возможных комбинаций используется матрица инцидентности.

Метод синтеза с использованием N-дольных графов [9] позволяет группировать функции технического объекта по реализациям.

Структурный синтез по альтернативным деревьям [10, 11] содержит механизмы декомпозиции функций системы, при этом корень дерева соответствует основной технической функции класса объектов, висячие вершины (листья) представляют технические реализации, связи дерева описывают способы разбиения технических функций на подфункции.

Выделим следующие особенности комбинаторно-логических методов структурного синтеза: техническая система или процесс имеет структуру; техническая система принадлежит к некоторому классу объектов, имеющих одинаковое функциональное назначение; множество аналогов и прототипов обладает достаточной мощностью для того, чтобы поиск новых сочетаний в этом комбинаторном пространстве был результативен; составные части

объектов класса обладают "хорошими комбинаторными способностями".

Однако существующие методы структурного синтеза технических систем не могут быть напрямую применены для решения задачи синтеза открытых информационных систем, поскольку: описывают альтернативные фиксированные наборы компонентов; отсутствует формализация интероперабельности и иных ограничений на компоненты; требуют модификации для использования в прикладных решениях, ориентированных на единые информационные пространства.

Синтез ОИС иерархичен и адаптивен и направлен на формирование многокомпонентных структур, элементы которых представляют собой блоки (черные ящики), обладающие стандартизированными свойствами (параметрами), для каждого из которых определяется свой домен (базовый тип плюс ограничения, задаваемые диапазоном, перечислением или шаблоном). Параметры блоков, связанные ассоциативно с точками доступа (вход, выход), определяют интерфейсы компонентов ОИС. На системном уровне множество блоков не обладает структурой (является неструктурированным). Процесс структурирования заключается в формировании цепочек компонентов, причем два любых соседних компонента могут быть сопряжены непосредственно по входам/выходам.

Получаемые многокомпонентные структуры могут быть использованы при онтологическом описании информационных процессов, требований/ограничений, технических (программных/аппаратных) систем. Известно, что базовым механизмом синтеза элементов онтологии является логический вывод, базирующийся на теоретико-множественных операциях и дескрипционной логике, выполняемый на графах. Таким образом, при построении алгоритмов синтеза ОИС неизбежно возникают проблемы выявления классов NP-полных задач.

Еще одной особенностью является то, что сам граф является динамическим, т. е. в общем случае для двух любых компонентов время их регистрации в системе отличается. Можно говорить о потоке заявок на регистрацию блоков и их свойств, носящем стохастический характер, причем регистрация каждого нового компонента приводит к необходимости реструктурирования графа, формированию новых узлов и новых связей. *В этом случае алгоритмическая обработка осуществляется системой обработчиков, для каждого из которых граф представляет собой разделяемый ресурс.*

Регистрация каждого компонента приводит к инициализации цепочки преобразований графовой структуры, т. е. к изменению его состояния.

Таким образом, ввиду стохастической природы потока заявок на регистрацию компонент, конечного числа преобразователей графа, а также с учетом того факта, что хранение графовой структуры носит распределенный характер, синтезирующий алгоритм может быть представлен посредством системы обработчиков (процессов), взаимодействие (синхронизация, контроль критических областей, связанных с разделяемым ресурсом, обработка прослушивания, прием и обработка заявок на регистрацию компонент) может быть представлено недетерминированным конечным автоматом.

1. Постановка задачи. Требования и ограничения синтезируемой системы

На основе вышеизложенного может быть сформулирована постановка задачи построения информационных моделей, обладающих свойствами расширяемости и масштабируемости, обеспечивающих независимый ввод, редактирование и хранение данных о компонентах ОИС, их свойствах и интерфейсах, регламентируемых известными открытыми спецификациями, а также алгоритмов синтеза многокомпонентных структур на их основе.

Расширяемость информационной модели заключается в способности добавления новых компонент и многокомпонентных структур без необходимости внесения изменений в существующие элементы и связи между ними. В первую очередь это достигается за счет слоя метауровня, на котором должны быть определены все базовые классы и связи между ними, а также за счет выделения отдельных информационных уровней, позволяющих локализовать синтез системных свойств на основе обработки сильносвязанных элементов и разграничить обработку слабосвязанных элементов. Кроме того, необходимо выполнить отдельным уровнем формализацию спецификаций, благодаря которому свойства и интерфейсы каждого нового компонента будут отображаться на пространство эталонных (стандартизированных) свойств и интерфейсов. Это позволит реализовать пополнение модели из множества независимых источников.

Масштабируемость информационной модели заключается в способности сформиро-

вать результаты синтеза многокомпонентных структур за интервал времени, в течение которого они не теряют своей актуальности. В условиях стохастического потока заявок на регистрацию компонент, а также следующего за этим синтеза интерфейсов и многокомпонентных структур масштабируемость обеспечивается фрагментацией информационной модели с последующей ее параллельной обработкой.

2. Онтологическое моделирование многокомпонентных интероперабельных структур

В работе [12] был предложен онтологический каркас ОИС, регламентирующий множество базовых концептов и ролей, описывающих взаимосвязи объектов ОИС на уровне нормативной документации, информационных процессов (бизнес-процессов), программно-аппаратных комплексов. В каркасе введены такие концепты, как *Interface* (Интерфейс), *Parameter* (Параметр), *Restriction* (Ограничение), причем ограничения могут быть двух типов: перечисления и диапазон, а также определены роли, связывающие блоки документов, определяющих интерфейсы с блоками стандартизированных профилей ОИС. Введенный концепт *Interface Profile* (Профиль интерфейса) предназначен для группирования параметров, определенных стандартизированным профилем ОИС. В такой постановке возникает избыточность, связанная с тем, что требуется хранить данные о блоках спецификаций и блоках стандартизированных профилей, которые являются одновременно и блоками спецификаций. Дополнительно стоит отметить тот факт, что ряд ограничений определяется функциями, которые формируют подмножества базового типа, либо исключаемые из области определения параметра, либо принимаемые за область определения.

Для устранения этого недостатка был введен концепт *Domain*, индивиды которого формируются, с одной стороны, на основе параметров, определенных в блоках спецификаций, а с другой — они связаны с индивидами свойств программных или аппаратных компонент. На рис. 1 показан фрагмент семантической модели, отражающий связь доменов, определенных в спецификациях, с областями определения свойств компонент и интерфейсами.

Свойства компонент, для которых такая связь существует, назовем *стандартизированными*. Если все свойства компонента стандар-

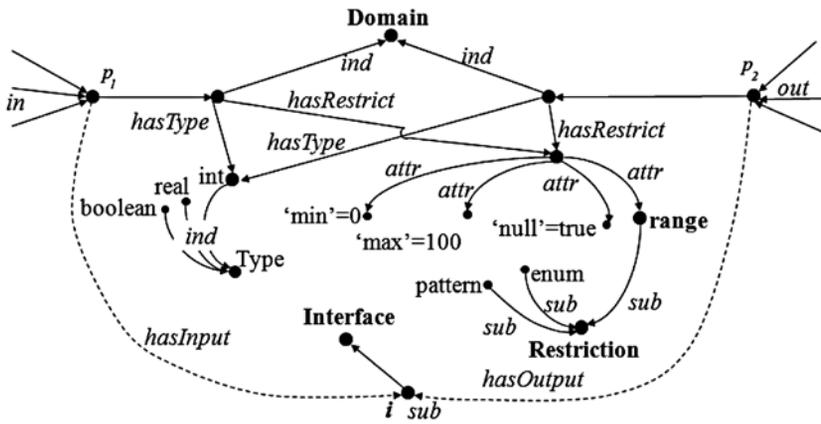


Рис. 1. Связь доменов с областями определения свойств и интерфейсами

тизированы, то компонент является стандартизированным.

Итак, каждый компонент, добавляемый в систему, дополняется свойствами, которые привязываются к точкам доступа типа вход/выход и стандартизируются посредством системы концептов и ролей, определенных в онтологическом каркасе, о котором говорилось ранее. Для каждого параметра блока синтезируется индивид-Домен, связанный с индивидами, определяющими базовый тип, и возможные ограничения, такие как диапазон (*range*), перечисление (*enum*), шаблон (*pattern*). На рис. 1 определены два параметра: p_1 привязан к точке доступа типа "вход" одного блока, а p_2 привязан к точке доступа типа "выход" другого блока. Считаем, что существует функцио-

нальное отображение $f: f(p_1) = s_1, f(p_2) = s_2$, где s_1, s_2 — ограничения параметров, определяемые спецификациями. Поскольку для s_1, s_2 определены базовый тип и ограничения, то они определены также и для p_1, p_2 . Пусть d_1, d_2 — области допустимых значений p_1, p_2 , задаваемые базовым типом данных x и ограничениями r , вводимыми на x . Тогда, если для p_1, p_2 справедливо $f(p_1) = f(p_2)$, то d_1, d_2 обладают общим базовым типом и общими ограничениями на нем.

Так как p_1 связан с точкой доступа типа "вход", а p_2 с точкой доступа типа "выход", то возможен информационный процесс между связанными с ними блоками и можно выполнить переход от доменов к единому интерфейсу i . Переход осуществляется забывающим функтором, скрывающим данные о доменах [13].

На рис. 2 представлена схема *ABox* [14], иллюстрирующая систему концептов и ролей, используемых при регистрации блоков, их свойств и доменов, а также их стандартизации. Для простоты рассматривается множество, состоящее из четырех блоков b_1, \dots, b_4 , каждый из которых обладает двумя свойствами с определенными доменами.

Свойства привязываются к точкам доступа блоков посредством ролей "hasProp" (свойство принадлежит блоку), "in", "out" (свойство привязано к точке доступа типа "вход" или "выход"). Стандартизация свойств осуществляется путем их функционального отображения на параметры спецификаций, вследствие чего с каждым свойством блока сопоставляется копия домена, определенного в спецификации и связанного с результирующим параметром той же спецификации. В результате стандартизации между свойством и его базовым блоком появляется свойство "hasSTProp" (свойство было сопоставлено с параметром спецификации, и поэтому оно стандартизировано).

На следующем этапе происходит сопоставление доменов интерфейсных прошедших стандартизацию свойств зарегистрированных блоков, в результате чего формируется слой интерфейсов [13] (рис. 3).

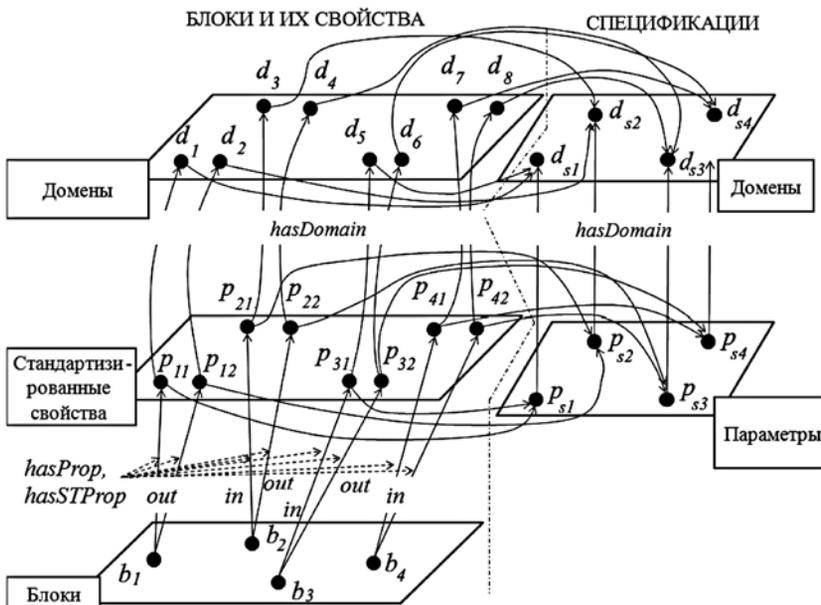


Рис. 2. Регистрация и стандартизация блоков и их свойств

На текущем уровне выполняется переход от блоков с доменными ограничениями по входу и выходу к компонентам и их интерфейсам, причем домен, привязанный к точке входа/выхода, отображается на интерфейс лишь в том случае, если через связанную с ним точку доступа существует канал обмена данными между двумя и более блоками. Далее выполняется синтез связей между компонентами *compatible* (существование канала передачи данных от компонента источника к компоненту приемнику).

Синтез многокомпонентных структур осуществляется посредством фильтрации построенной структуры *compatible*-связности компонентов.

Итак, процесс синтеза многокомпонентных структур является иерархическим, при переходе между соседними уровнями формируются новые обобщающие конструкции:

- при переходе от доменов к интерфейсам (обработка терминологической аксиомы машиной логического вывода);
- при переходе от интерфейсов к совместимости (переход к транзитивному замыканию ролей *in*, *out* на *compatible*);
- при переходе от сети совместимых компонентов к *n*-компонентным структурам.

Как было отмечено выше, структуры совместимых компонент используются на уровнях информационных процессов, требований/ограничений, техническом (программном/аппаратном) и могут образовывать межуровневые структуры совместимых компонент.

Выделим следующие межуровневые связи:

1. "Информационный процесс" — "Технический компонент" (технический компонент автоматизирует информационный процесс, обладает подмножеством интерфейсов компонента информационного процесса).

2. "Требование/Ограничение" — "Технический компонент" (технический компонент удовлетворяет требованиям/ограничениям, обладает подмножеством интерфейсов компонента требований/ограничений).

3. "Требование/Ограничение" — "Информационный процесс" (ин-

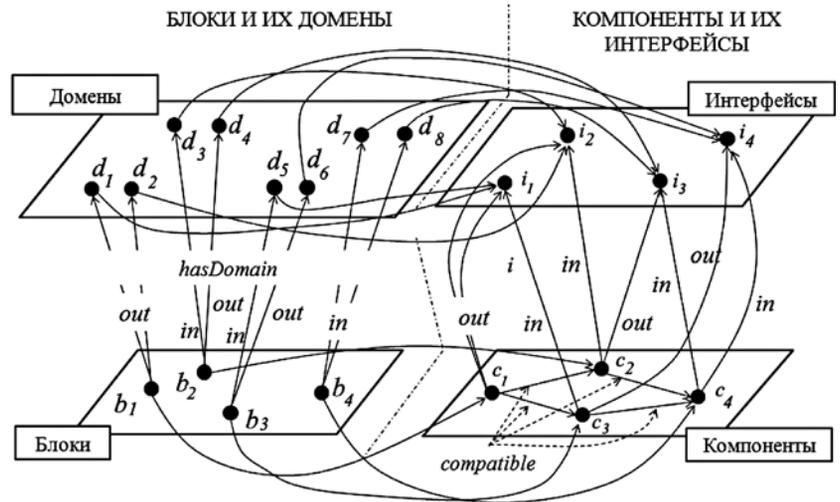


Рис. 3. Синтез интерфейсов и компонентов

формационный процесс удовлетворяет требованиям/ограничениям, обладает подмножеством интерфейсов компонента требований/ограничений).

Вместе с тем синтез целевой многокомпонентной интероперабельной структуры (МИС) представляет собой иерархический процесс, каждый уровень которого обладает независимой системой событий, формализуемой недетерминированным конечным автоматом (НДА) (рис. 4).

Операции сопряжения компонентов на одном уровне и между уровнями имеют следующие ключевые отличия. Если для компонента одного из уровней не существует ни одного со-

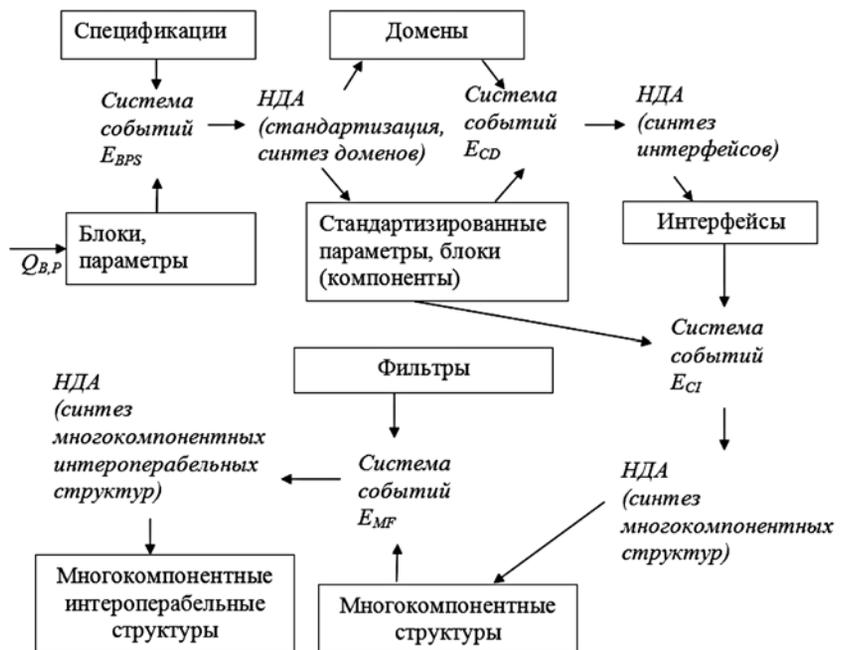


Рис. 4. Общая схема синтеза МИС на основе НДА

вместимого компонента другого уровня, то этот компонент не является элементом результирующей структуры и удаляется из нее. Один уровень является фильтрующим, а другой — фильтруемым, а операция межуровневого совмещения компонентов называется фильтрацией.

Фильтрующими являются:

- "информационный процесс" в связи "информационный процесс \leq > технический компонент";
- "требование/ограничение" в связи "требование/ограничение \leq > технический компонент";
- "требование/ограничение" в связи "требование/ограничение \leq > информационный процесс".

3. Формализация и построение алгоритмов управления взаимодействующими процессами синтеза МИС на основе НДА

Синтез МИС включает два основных этапа: сопряжение компонентов в пределах одного уровня (синтез многокомпонентных структур), фильтрация или сопряжение компонентов, принадлежащих различным уровням (синтез многокомпонентных интероперабельных структур).

Первый этап разбивается на следующие шаги: а) синтез интерфейсов; б) синтез пар блоков, сопряженных через интерфейсы; в) синтез комплексных блоков (блоки, определяемые подпоследовательностями сопряженных блоков, причем у комплексных блоков входной интерфейс совпадает с входным интерфейсом первого блока последовательности, а выходной интерфейс — с выходным интерфейсом последнего блока подпоследовательности сопряженных блоков).

Второй этап представлен следующими шагами: а) синтез фильтрующих интерфейсов; б) фильтрация в пределах межуровневых связей.

Синтез целевой ОИС является результатом композиции интероперабельных структур.

Базовой моделью, отражающей структурные и параметрические аспекты МИС, является граф, и реализация выделенных шагов сводится к решению задач: изменения структуры подграфов (добавление, изменение, удаление ребер и узлов); поиск подграфов; кластеризация на одном графе; кластеризация на множестве графов.

Таким образом, алгоритмическое обеспечение синтеза МИС представляет собой комплекс информационно-поисковых и CUD-ал-

горитмов (CREATE, UPDATE, DELETE) на распределенных графовых структурах большой размерности.

В работах А. А. Шальто [15—17], Н. П. Вашкевича [18] заложены теоретические основы параллельных алгоритмов обработки данных большой размерности с позиций конечных недетерминированных автоматов, и тогда переход от онтологической модели к событийной позволяет: а) выполнять управляемую событиями инициализацию алгоритмов (необходимо из-за существования стохастических потоков заявок на регистрацию новых компонентов, а также потоков запросов на формирование целевых ОИС); б) сгруппировать алгоритмы по переходам между соседними уровнями; в) сгруппировать алгоритмы по вычислительным процессам; г) организовать управление взаимодействующими процессами синтеза МИС в распределенной вычислительной среде.

Рассмотрим подробнее НДА регистрации, стандартизации блоков и их свойств и синтеза доменов. В начальный момент времени автомат (рис. 5) обладает активными событиями ожидания поступления данных о компонентах. Индекс i в обозначении состояния является идентификатором ожидающего процесса. Если в этом состоянии автомат на входе получает вектор данных о компоненте (о свойствах блоков), то он переходит к нескольким событиям:

1. Событие Reg связано с синтезом индивидов "Свойство", а также с формированием роли, соединяющей точки доступа блока со свойствами. Если свойство составное, то формируются роли $hasComposProp$ и $hasSubProp$.

2. Событие W_{p_i} связано с активизацией следующего потока в очереди потоков (если существуют свободные потоки).

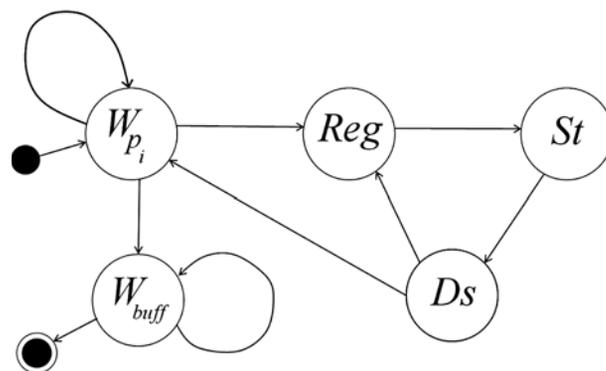


Рис. 5. НДА регистрации и стандартизации блоков и их свойств

3. Событие W_{buff} связано с буферизацией входящих запросов (если все потоки выполнят алгоритмическую обработку онтологии, нет ожидающих).

По завершению регистрации свойств компонентов i -м потоком автомат переходит к событию St , связанному с поиском блока спецификации s_p . Также событие может быть инициировано в результате пользовательского ввода данных о части спецификации, содержащей описание необходимых параметров, ограничений и правил интерпретации. На выходе также передается индекс потока, завершившего регистрацию свойств.

Далее инициируется событие DS синтеза доменов стандартизированных параметров, из которого автомат может вернуться к событию Reg , если на входе наблюдается значение буфера заявок > 0 , или к событию W_{p_i} , если буфер пуст. Также, в случае пустого буфера, автомат сбрасывает событие W_{buff} .

Другие НДА используются на этапах синтеза интерфейсов и многокомпонентных структур. Их подробное рассмотрение остается за рамками статьи.

Заключение

В работе предложен обобщенный метод синтеза МИС, основанный на онтологии компонентов, их интерфейсов, а также на формализации и реализации алгоритмов управления взаимодействующими процессами, осуществляющими операции синтеза на всех уровнях онтологического представления.

Предложена многоуровневая онтологическая модель МИС, обеспечивающая переход к системе событий, что позволяет локализовать алгоритмическую обработку базового графа, а также:

а) выполнять управляемую событиями инициализацию алгоритмов (необходимо из-за существования стохастических потоков заявок на регистрацию новых компонентов, а также потоков запросов на формирование целевых ОИС);

б) сгруппировать алгоритмы по переходам между соседними уровнями;

в) сгруппировать алгоритмы по вычислительным процессам;

г) организовать управление взаимодействующими процессами синтеза МИС в распределенной вычислительной среде.

1. Гуляев Ю. В., Журавлев Е. Е., Олейников А. Я. Методология стандартизации для обеспечения interoperability информационных систем широкого класса. Аналитический обзор // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 3. URL: jre.cplire.ru/jre/Mar/12/2/text/pdf (дата обращения: 14.06.2018).
2. RFCs. Memos in the RFC document series contain technical and organizational notes about the Internet. URL: <http://www.ietf.org/standards/rfcs/> (дата обращения: 14.06.2018).
3. W3C Strategic Highlights. Technical Report/May. 2018. URL: <https://www.w3.org/2018/05/w3c-highlights/> (дата обращения: 14.06.2018).
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9594-1—98 Информационная технология (ИТ). Взаимосвязь открытых систем. Справочник. Часть 1. Общее описание принципов, моделей и услуг. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200028703/> (дата обращения: 14.06.2018).
5. Зиченко Ю. В., Голобородько А. А. Обзор современных систем автоматизированного проектирования // Потенциал современной науки. 2016. № 4 (21). С 68—71.
6. Системы имитационного моделирования: выбираем подходящую. ГК Ланит, 2018. URL: <https://habr.com/company/lanit/blog/351870/> (дата обращения: 14.06.2018).
7. Одрин В. М., Картавов С. С. Морфологический анализ систем. Киев: Нукова Думка, 1977. 148 с.
8. Закревский А. Д. Алгоритмы синтеза дискретных автоматов. М.: Наука, 1971. 511 с.
9. Божко А. Н., Толпаров А. Ч. Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью // Наука и Образование: электронное научно-техническое издание. 2004. № 5.
10. Сафронов В. В. Методы оптимизации структур сложных систем. Саратов: СВВКИУ РВ, 1993. 94 с.
11. Сафронов В. В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования. Саратов: Научная книга, 2009. 329 с.
12. Жевнерчук Д. В. Онтологический каркас поддержки профилирования вычислительных систем // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 2.1 (56). Москва—Воронеж: ИПУ РАН — ВГТУ. С. 187—190.
13. Ломакина Л. С., Жевнерчук Д. В. Синтез открытых информационных систем с использованием алгебраических структур как моделей // Фундаментальные исследования. 2017. № 10. С. 29—33.
14. Бездушный А. А. Математическая модель системы интеграции данных на основе онтологий // Вестник НГУ. Сер. "Информационные технологии". Новосибирск. 2008. Т. 6, Вып. 2. С. 15—40.
15. Лукин М. А., Шалыто А. А. Разработка и автоматическая верификация параллельных автоматных программ // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5 (66). С. 43—50.
16. Pavlov A., Sokolov B., Pashchenko A., Shalyto A., Maklakov G. Models and methods for multicriteria situational flexible reassignment of control functions in man-machine systems // Proceedings of the 8th IEEE International Conference Intelligent Systems (IEEE IS'2016). September 4—6 2016, Sofia, Bulgaria.
17. Dubinin V., Vyatkin V., Shalyto A. Formal modeling and verification of IEC 61499 function blocks on the basis of transition systems // Proceedings of International Siberian conference on control and communications (SIBCON 2016). M., 2016. 4 p. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491701.
18. Вашкевич Н. П., Бикташев Р. А. Недетерминированные автоматы и их использование для реализации систем параллельной обработки информации. Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. 394 с.

A Generalized Method for Synthesizing Multicomponent Interoperable Structures Based on Ontology and a Nondeterministic Finite State Machine

The work is devoted to the problem of synthesis of multicomponent interoperable structures (MIS), which belongs to the class of open information systems structurally-parametric synthesis problems. A generalized method for synthesizing MIS based on the standardized components ontological representation, their interfaces and formed multicomponent structures is proposed. It is shown that the synthesis of MIS can be reduced to the task of managing interacting processes for the organization of distributed processing of ontology as a shared, distributed resource. A system of events is proposed, presented in the form of a nondeterministic finite state machine, which allows one to formalize and implement algorithms for controlling the multiprocess synthesis system for MIS.

Keywords: open information system, component, interface, multicomponent structure, interoperability, structural-parametric synthesis, nondeterministic finite state machine, distributed algorithm

DOI: 10.17587/it.25.67-74

References

1. Gulyaev Y. V., Zhurtavlev E. E., Oleinikov A. Y. *Metodologiya standartizatsii dlya obespecheniya interoperabel'nosti informacionnih sistem shirokogo klassa. Analiticheskii obzor* (Methodology of standardization for providing interoperability of information systems of a wide class. Analytical review), *Zhurnal Radioelektroniki*, 2012, no. 3, available at: jre.cplire.ru/jre/Mar/12/2/text/pdf. (date of access: 14.06.2018) (in Russian).
2. RFCs. Memos in the RFC document series contain technical and organizational notes about the Internet, available at: <http://www.ietf.org/standards/rfcs/> (date of access: 14.06.2018).
3. W3C Strategic Highlights. Technical Report/May, available at: <https://www.w3.org/2018/05/w3c-highlights/> (date of access: 14.06.2018).
4. GOST R ISO / MEK 9594-1—98. *Informacionnaya tehnologiya (IT). Vzaimosvyaz' otkritih sistem. Spravochnik. Chast' 1. Obschee opisanie principov, modelei I uslug* (GOST R ISO / IEC 9594-1—98 Information technology (IT). Interconnection of open systems. Directory. Part 1. General description of principles, models and services), available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200028703/> (date of access: 14.06.2018) (in Russian).
5. Zinchenko Y. V., Goloborodko A. A. *Obzor sovremennih sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya* (Overview of modern CAD systems), *Potencial Sovremennoi Nauki*, 2016, no. 4 (21), pp. 68—71 (in Russian).
6. *Sistemi imitacionnogo modelirovaniya: vibiraem podhodyashchuyu* (Simulation systems: choose the appropriate), GK Lanit, 2018, available at: <https://habr.com/company/lanit/blog/351870/> (date of access: 14.06.2018) (in Russian).
7. Odrin V. M., Kartavov S. S. *Morfologicheskii analiz sistem* (Morphological analysis of systems), Kiev, Nukova Dumka, 1977, 148 p. (in Russian).
8. Zakrevskii A. D. *Algoritmi sinteza diskretnih avtomatov* (Algorithms for the synthesis of discrete automata), Moscow, Nauka, 1971, 511 p. (in Russian).
9. Bozhko A. N., Tolparov A. Ch. *Strukturnii sintez na elementah s ogranichennoi sochetaemost'yu* (Structural synthesis on elements with limited compatibility), *Nauka I Obrazovanie: elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie*. 2004, no. 5 (in Russian).
10. Saphronov V. V. *Metodi optimizatsii struktur slozhnih sistem* (Methods for optimizing the structures of complex systems), Saratov, SVVKIU RV, 1993, 94 p. (in Russian).
11. Saphronov V. V. *Osnovy sistemnogo analiza: metody mnogo-vektornoj optimizatsii i mnogovektornogo ranzhirovaniâ* (Fundamentals of system analysis: methods of multi-vector optimization and multi-vector ranking: monograph), Saratov, Nauchnaya kniga, 2009, 329 p. (in Russian).
12. Zhevnerchuk D. V. *Ontologicheskii karkas podderzhki profilirovaniya vichislitel'nykh sistem* (Ontological framework for supporting the profiling of computing systems), *Sistemi Upravleniya i Informacionnie Tehnologii*, 2014, no. 2.1 (56), Moscow — Voronezh, IPU RAN — VGTU, pp. 187—190 (in Russian).
13. Lomakina L. S., Zhevnerchuk D. V. *Sintez otkritih informacionnih sistem s ispol'zovaniem algebraicheskikh struktur kak modelei* (Synthesis of open information systems using algebraic structures as models), *Fundamental'nie Issledovaniya*, 2017, no. 10, pp. 29—33 (in Russian).
14. Bezduzhnii A. A. *Matematicheskaya model sistemi integratsii dannih na osnove ontologii* (Mathematical model of data integration system based on ontologies), *Vestnik NGU, ser. "Informacionnie tehnologii"*, Novosibirsk, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 15—40 (in Russian).
15. Lukin M. A., Shalyto A. A. *Razrabotka i avtomaticheskaya verifikatsiya parallel'nykh avtomatnykh program* (Development and automatic verification of parallel automata programs), *Informacionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2013, no. 5 (66), pp. 43—50 (in Russian).
16. Pavlov A., Sokolov B., Pashchenko A., Shalyto A., Maklakov G. Models and methods for multicriteria situational flexible reassignment of control functions in man-machine systems, *Proceedings of the 8th IEEE International Conference Intelligent Systems (IEEE IS'2016)*, September 4—6 2016, Sofia, Bulgaria.
17. Dubinin V., Vyatkin V., Shalyto A. Formal modeling and verification of IEC 61499 function blocks on the basis of transition systems, *Proceedings of International Siberian conference on control and communications (SIBCON 2016)*, Moscow, 2016, 4 p. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491701.
18. Vashkevich N. P., Biktashev R. A. *Nedeterminirovannii avtomat i ih ispol'zovanie dlya realizatsii parallel'noi obrabotki informatsii* (Non-deterministic automata and their use for the implementation of parallel processing systems: Monograph), Penza, Publishing house of PGU, 2016, 394 p. (in Russian).

Н. К. Трубочкина, д-р техн. наук, проф., e-mail: ntrubochkina@hse.ru,

С. К. Поляков, бакалавр, e-mail: savvapolyakov1@gmail.com,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва

Система электронного голосования на основе технологии блокчейн с использованием смарт-контракта

В современном демократическом цифровом обществе возрастает актуальность проведения открытых и объективных голосований с использованием новых информационных технологий. Существующие решения практически используемых систем голосования сосредоточены на технических и юридических проблемах, а не на применении новых информационных технологий в стадии самого голосования. В статье проанализированы проблемы современных избирательных систем, и на основании анализа их недостатков предложены метод, алгоритмы и программная реализация системы голосования на основе применений технологии блокчейн со специальной программной реализацией смарт-контрактов, в которой недостатки существующих систем устранены.

Ключевые слова: новые информационные технологии, блокчейн, смарт-контракт, электронное голосование, система голосования

Введение

В настоящее время демократическое голосование является одним из популярнейших методов решения общественно важных вопросов в развитых странах. Наиболее распространенным методом голосования является бумажная система. Данный метод обладает определенными недостатками, среди которых технические (фальсификации, ошибки в подсчетах, отсутствие прозрачности проведения), социальные и экономические (высокая стоимость для бюджета). Электронные системы голосования не получили своего распространения из-за проблем с безопасностью, верификацией результатов или некорректной работой программного обеспечения [7, 8].

Технология блокчейн (от *англ. blockchain* — цепочка блоков данных) предлагает новые возможности для разработки совершенно иных видов цифровых услуг благодаря ключевым особенностям этой технологии, таким как прозрачность и защищенность процесса передачи данных. Разработчики имеют возможность вывести систему голосования на новый информационно-технологический уровень, отвечающий современным требованиям. Применение смарт-контрактов в сочетании с технологией блокчейн поможет решить большую часть существующих проблем современных систем голосования.

Технология блокчейн основывается на транзакционной модели. Принцип работы технологии блокчейн изображен на рис. 1. Каждый пользователь имеет свой "кошелек" с уникаль-

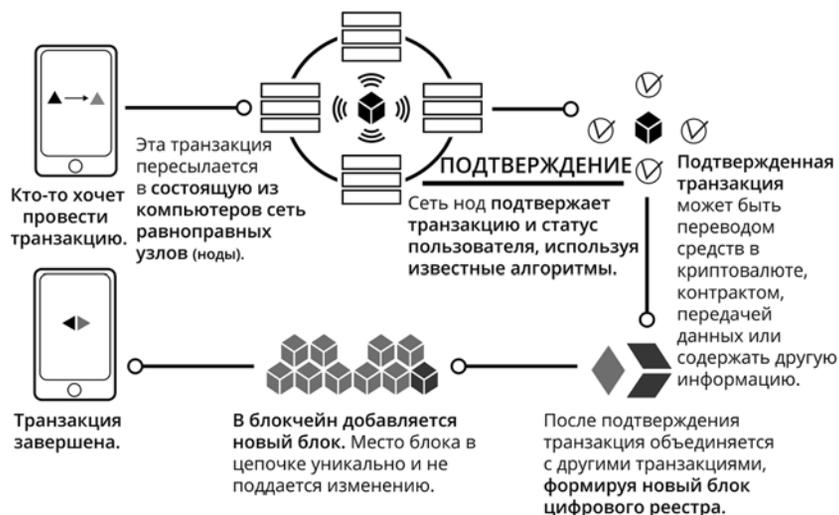


Рис. 1. Принцип работы технологии блокчейн

ными публичными/приватными ключами, которыми подтверждается любое действие пользователя. Транзакции (от *англ. transaction* — сделка, отправление), которые проводят все пользователи системы, хранятся в последовательных блоках. Так как хэш (от *англ. Hash*) данных предыдущего блока используется при генерации следующего, обеспечивается неизменность данных внутри блокчейна.

При изменении любого блока автоматически все последующие блоки становятся не валидными. Блокчейн устроен таким образом, что все транзакции хранятся одновременно на всех узлах в полном объеме, и они не могут быть удалены или изменены.

За счет этих ключевых особенностей технологии блокчейн идея его применения в системах голосования становится актуальной и оправданной. Блокчейн дает возможность заменить устаревшую технологию голосования, когда голос избирателя выражен физическим объектом, на передачу цифрового "токена" (от *англ. Token* — жетон). Как и во многих аналогичных случаях, переход процесса из физического мира в цифровой сокращает экономические издержки и повышает надежность.

Объективными преимуществами использования технологии блокчейн в процессе голосования являются:

1. Прозрачность процесса голосования. Любой человек получит возможность контролировать ход голосования, так как блокчейн дает возможность развернуть узел с полной копией всех данных, и каждый сможет самостоятельно их проанализировать.

2. Анонимность голоса. Любой из избирателей при получении доступа к голосованию генерирует индивидуальный публичный и приватный ключ, который он имеет право не разглашать другим участникам голосования. Никто, кроме него, не будет знать, что конкретный "кошелек", с которого был отправлен голос, принадлежит этому человеку.

3. Подлинность и надежность результатов. Результаты голосования, проведенного с помощью технологии блокчейн, невозможно сфальсифицировать, так как любой участник может проверить, сколько токенов-голосов было выпущено в начале голосования, и как они распределялись по кошелькам после.

4. Экономическая целесообразность и скорость обработки данных. Голосование всегда сопряжено с организационными сложностями, а также экономическими и временными затратами на проведение голосования и последующую обработку данных. Децентрализация, которая лежит в основе технологии блокчейн, позволит моментально увидеть результаты голосования, а для грамотного распределения нагрузки каждый субъект (регион/город) может использовать собственный узел системы.

Обзор и анализ систем цифрового голосования

Блокчейн-технология в системах цифрового голосования вызывает большой интерес, что приводит к появлению значительного числа исследований. В работах [1—3, 10] исследуются проблемы традиционных избирательных систем. Авторы сходятся во мнении, что существующие методы, в частности электронные системы, не могут обеспечить достаточный уровень прозрачности и надежности, что негативно сказывается на доверии избирателей. В данных исследованиях разбирается принцип работы технологии блокчейн, а также преимущества ее использования в системе выборов.

В табл. 1 представлен обзор и анализ работ о системах голосования на основе технологии блокчейн.

Необходимо подчеркнуть, что безопасность голосования всегда является самой большой проблемой при рассмотрении вопроса о внедрении цифровой системы голосования [6, 9]. Все авторы сходятся в том, что с учетом осо-

Таблица 1

Обзор и анализ аналогов

Содержание	Lubin J. (2016) [10]	Boucher P. (2016) [3]	Ben Ayed A. (2017) [2]	Barnes A., Brake C., Perry T. (2018) [1]
Анализ существующих избирательных систем	+	+	+	+
Обзор технологии блокчейн	+	—	+	—
Перспективы применения технологии блокчейн в избирательных системах	+	+	+	+
Практическая реализация системы голосования на основе технологии блокчейн	—	—	—	—

бенностей технологии блокчейн не может быть никаких сомнений в способности системы защитить данные от потенциальных атак и фальсификаций. Система голосования является сложным механизмом, при разработке которой нужно учитывать как человеческий фактор, так и особенности проведения голосований в конкретной стране.

Несмотря на то что авторы объясняют теоретическую основу технологии, описывают перспективы и достоинства подобной системы, *ни одно из рассмотренных выше исследований*

- *не определяет структуру работы системы голосования на практике, и*
- *в них отсутствуют конкретные методы, алгоритмы и программы для практической реализации системы.*

С учетом анализа недостатков указанных исследований была поставлена задача разработки системы голосования на основе технологии блокчейн, структуры ее работы, а также конкретных алгоритмов и программ для ее практической реализации.

Новизна

На основе изучения недостатков существующих систем голосования, а также анализа исследований, проведенных в области электронных голосований, предлагается *новая концепция смешанной избирательной системы*, основанная на использовании технологии блокчейн и написании смарт-контрактов.

Концепция, предложенная в данной работе, предполагает возможность ее внедрения в избирательную систему уже сейчас. Она позволит избежать возможности фальсификаций, сделает процесс голосования прозрачным и защищенным, сократит государственные издержки на проведение процедуры и подсчет голосов.

Предлагаемая система предполагает проведение голосования за счет смарт-контракта (от *англ. Smart contract* — "умного контракта"), написанного на языке Solidity и исполняемого в блокчейн-среде Ethereum ("Эфириум") [4].

Метод смарт-контракта

Самый доступный способ провести электронное голосование на базе блокчейна — разработать и запустить смарт-контракт (приложение) в уже существующих блокчейн-сетях.

Смарт-контракт — это программный код, способный контролировать и автоматически

осуществлять определенные действия и записывать их в блокчейн, далее мы более подробно коснемся этой темы.

Среда разработки

В качестве платформы для реализации предлагаемой системы была выбрана сеть Ethereum ("Эфириум"), так как данная платформа предоставляет широкие возможности для разработки D-Apps (с *англ.* — децентрализованные приложения) и смарт-контрактов. На данном блокчейне уже работают несколько проектов [13]: проект правительства Москвы "Активный гражданин", проект удаленной идентификации IDChain РосЕвроБанка и Microsoft [14], проект по обмену реквизитами банков (банки "Открытие", Сбербанк, АФТ, ВТБ) [12].

Алгоритмы

Рассмотрим алгоритм работы технологии блокчейн на конкретном примере голосования:

1. Избиратель хочет выбрать определенного кандидата, т. е. перевести свой токен (*голос*) на адрес выбранного им кандидата.

2. Эта транзакция пересылается в состоящую из компьютеров сеть равноправных узлов, называемых "нодами" (от *англ. Node* — узел). Сеть нода необходима для того, чтобы обработать (подтвердить) данную транзакцию. *Преимуществом* является то, что данная сеть может быть **децентрализована**, что снизит вероятность специального вмешательства в работу системы и повысит доверие избирателей.

3. Сеть нода подтверждает транзакцию и статус пользователя, используя специальные алгоритмы. В других системах подтвержденная транзакция может быть не только "голосом", а также передачей денег или данных.

4. После подтверждения транзакция объединяется с другими подтвержденными транзакциями, формируя новый блок цифрового реестра.

5. Данный блок добавляется в блокчейн с использованием хэша предыдущего блока, тем самым место каждого блока в цепочке становится уникальным и не подлежит изменению, так как в случае попытки изменить конкретный блок все последующие блоки становятся не валидными.

6. В итоге, транзакция завершена и записана в блокчейн, что гарантирует ее достоверность и защищенность, а выбранный кандидат

получает "голос", что автоматически отображается для всех наблюдателей.

Алгоритм голосования с использованием смарт-контракта — суть предлагаемого метода — изображен на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм голосования с использованием смарт-контракта

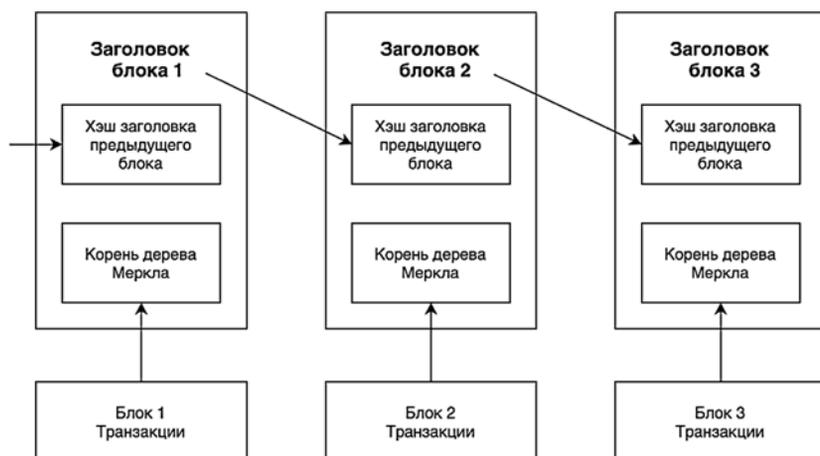


Рис. 3. Блокчейн — последовательность блоков

Основная технология — блокчейн

Технология блокчейн (*последовательность блоков*) была впервые представлена анонимным разработчиком (или группой разработчиков)

под псевдонимом Сатоши Накамото и была использована в электронной валюте Bitcoin, которая позволила проводить финансовые операции через Интернет, без потребности в финансовом учреждении или регуляторе [11]. Блокчейн — это упорядоченная структура данных, которая содержит блоки транзакций (рис. 3).

Транзакции, которые проводят все пользователи системы, хранятся в последовательных блоках. Исходный блок называется Genesis Block или "Блок 0". Genesis block создается по описанию, которое содержится в конфигурационном файле, разработчик блокчейна прописывает только его. Соответственно, в нулевом блоке не содержится ссылок на предыдущий блок.

Структура блока транзакций

В табл. 2 представлена структура блока транзакций согласно спецификации протокола, где

- version — версия блока;
- prev_block — хэш предыдущего блока (parent block);
- merkle_root — хэш всех транзакций в блоке;
- timestamp — дата и время создания блока;

Таблица 2

Структура блока согласно спецификации протокола

Размер поля	Наименование	Тип данных	Примечание
4	version	int32_t	Информация о версии блока
32	prev_block	char[32]	Хэш-значение предыдущего блока, на который ссылается данный блок
32	merkle_root	char[32]	Ссылка на дерево Меркла, которое является хэшем всех транзакций, связанных с этим блоком
4	timestamp	uint32_t	Запись временной метки Unix при создании блока
4	bits	uint32_t	Вычислительная сложность, используемая для блока
4	nonce	uint32_t	Код, используемый для создания этого блока (вычисления хэша)
?	txn_count	var_int	Номер транзакции
?	txns	tx[]	Транзакции блока, в формате "tx"

- bits, nonce — параметры майнинга (от англ. Mining — генерация новых блоков);
- txn_count, txns — число транзакций в блоке и их список.

Первые шесть параметров (все, кроме txn_count и txns) образуют заголовок блока (header). Именно хэш заголовка называют хэшем блока, т. е. сами транзакции непосредственного участия в хэшировании не принимают, вместо этого они заносятся в особую структуру — дерево Меркла.

Алгоритм Secure Hash Algorithm (SHA-256)

Для генерации 256-битного хэша фиксированного размера используется алгоритм Secure Hash Algorithm (SHA-256) (рис. 4).

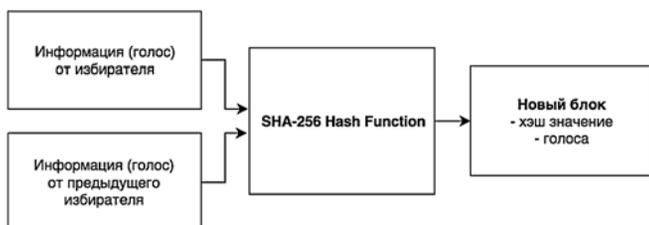


Рис. 4. Схема хэширования в блокчейн-системе голосования

SHA-256 является самой популярной криптографической хэш-функцией [5]. Данный алгоритм является строго односторонней функцией, и может принимать в качестве входного текст любого размера и зашифровывать его до 256-байтового двоичного значения.

Поскольку хэш данных предыдущего блока используется при генерации следующего, обеспечивается неизменность данных внутри блокчейна. При изменении любого блока автоматически все последующие блоки становятся не валидными. Блокчейн устроен таким образом, что все транзакции хранятся одновременно на всех узлах в полном объеме, и они не могут быть удалены или изменены.

Алгоритм построения дерева Меркла

Дерево Меркла [11] — это структура данных, также известная как бинарное дерево хэшей (рис. 5), которая позволяет проводить упрощенную верификацию транзакций.

Построим дерево Меркла, используя распределенный алгоритм двойного хэширования SHA-256:

1. Считаются хэши всех транзакций в блоке, допустим, транзакции А:

$$\text{hash}(A) = \text{SHA256}(\text{SHA256}(A)) = H_A.$$

2. После этого считаются хэши от суммы хэшей транзакций, допустим, транзакций А и В:

$$\begin{aligned} \text{hash}(H_A + H_B) &= \\ &= \text{SHA256}(\text{SHA256}(H_A + H_B)) = H_{AB}. \end{aligned}$$

3. Точно так же считаем хэши от суммы получившихся хэшей:

$$\begin{aligned} \text{hash}(H_{AB} + H_{CD}) &= \\ &= \text{SHA256}(\text{SHA256}(H_{AB} + H_{CD})) = H_{ABCD}. \end{aligned}$$

4. Далее продолжаем выполнять алгоритм по рекурсии. Так как дерево бинарное, то на каждом шаге оно должно иметь четное число элементов. Поэтому если, например, у нас только три транзакции, то последняя транзакция просто дублируется (рис. 5).

5. Процесс продолжается до тех пор, пока не получится один единственный хэш — он и называется merkle_root (данное значение записывается в заголовок (header) блока).

Теперь для проверки информации о транзакции нет необходимости пересчитывать все хэши, достаточно запросить доказательство Меркла (состоит из корня дерева Меркла и ветви, включающей хэши от запрашиваемой транзакции до корня). Сложив запрошенные хэши и сравнив их с корнем, убеждаемся, что транзакция находится на своем месте.

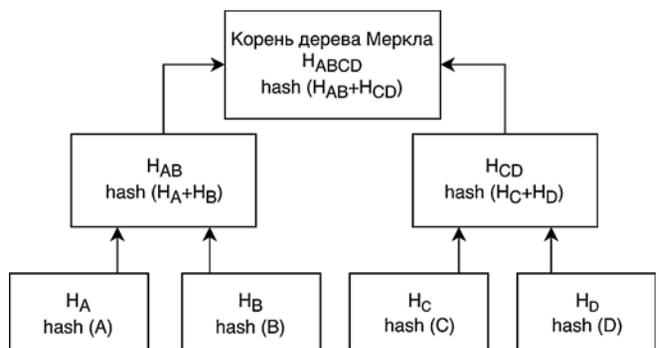


Рис. 5. Структура дерева Меркла

Смарт-контракт (алгоритм)

Смарт-контракт — условие или алгоритм, предназначенный для заключения и поддержания контрактов, реализованных в блокчейне. Смарт-контракты дают возможность осуществлять конфиденциальные и надежные транзакции без участия внешних посредников.

Для корректной работы и исполнения условий смарт-контракта:

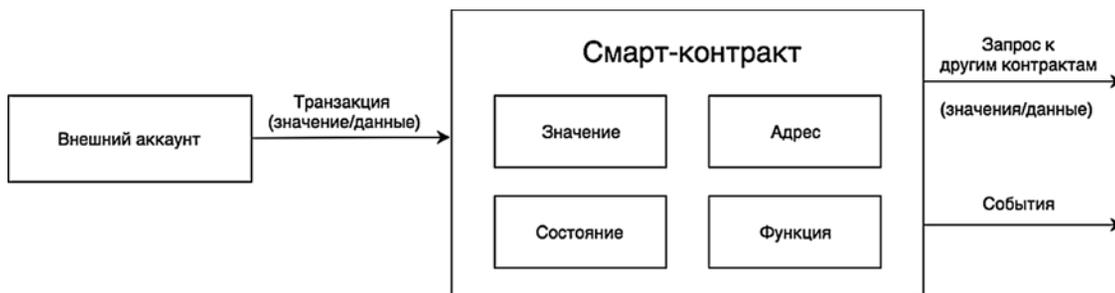


Рис. 6. Алгоритм работы смарт-контракта

- необходима среда, которая позволяет автоматизировать выполнение контракта, такая как блокчейн;
- для реализации поставленной проектной задачи также важно, что транзакции внутри блокчейна являются отслеживаемыми, прозрачными, без возможности изменить или удалить транзакцию;
- все условия контракта должны иметь прозрачную логику исполнения и математическое описание;
- смарт-контракт автоматизированно определяет достижение или нарушение своих пунктов, отталкиваясь от запрограммированных условий.

Из всего вышесказанного следует, что основная идея смарт-контрактов состоит не только в автоматизации выполнения условий, но и в достоверности их исполнения.

Алгоритм работы смарт-контракта показан на рис. 6.

Смарт-контракт размещается в блокчейне, где вся его логическая структура помещается в **программный блок**.

Программный блок связывает все сведения, имеющие отношение к определенному смарт-контракту. Данные сведения могут исполнять роль входа и выхода программного кода контракта и могут запускать какие-либо действия за пределами блокчейна.

Обязательными свойствами смарт-контракта являются:

- 1) применение метода электронной подписи на базе публичных или приватных ключей, находящихся у двух и более сторон соглашения;
- 2) существование приватной децентрализованной среды, в которой вносится смарт-контракт;
- 3) суть договора и существование обязательных для его исполнения инструментов;
- 4) точно отображенные условия его выполнения, подтверждаемые подписью участников договора, и надежность источника данных.

Значительное число различных договорных отношений как между людьми, так и между человеком и государственными органами возможно реализовать частично или полностью самовыполняемыми. Криптография, которая лежит в основе смарт-контрактов, предоставляет более высокий уровень безопасности и защищенности, чем традиционные договоры, основанные исключительно на праве. Также смарт-контракты могут снижать экономические издержки, риски неоднозначных трактовок договора, риски использования "юридических махинаций" и человеческий фактор.

Исходя из вышесказанного, можно отметить следующие основные преимущества смарт-контрактов, в сравнении с традиционными контрактами:

1. Экономия и скорость — системы на основе блокчейна устраняют посредников и автоматизируют множество процессов.
2. Защищенность — смарт-контракт хранится в блоке в зашифрованном виде, а также многократно продублирован.
3. Надежность — выполнение условий смарт-контракта гарантируется математическими законами, а технология блокчейн исключает подмену информации.
4. Точность — минимизация человеческого фактора снижает вероятность ошибок.

Практическая реализация системы голосования

Требования к системе голосования

1. **Аутентификация.** Иметь возможность голосовать должно определенное число людей, имеющих на это право. Система не должна поддерживать процесс самостоятельной регистрации, список избирателей должен быть подготовлен и загружен заранее. Непосредственно перед голосованием избиратель должен пройти дополнительный процесс аутентификации, в противном случае его голос ("токен") не дол-

жен использоваться. Также процесс дополнительной аутентификации на избирательном участке не даст возможность третьим лицам использовать "голос" избирателя вне его ведома.

2. *Анонимность.* Система голосования должна исключать какие-либо связи между личностью избирателя и его "голосом" (токеном). Избиратель и его выбор должны оставаться полностью анонимным во время и после голосования.

3. *Точность.* Результаты должны быть абсолютно объективными, каждый "голос" (токен) должен учитываться, не может быть изменен, продублирован или удален.

4. *Открытость.* Система должна иметь возможность проверки процесса голосования в режиме реального времени.

5. *Защищенность.* Система должна быть абсолютно защищена от различного вида программных атак, перехвата информации третьими лицами или вмешательства в процесс голосования.

6. *Масштабируемость.* Система должна быть рассчитана на возможность проведения голосований федерального или муниципального масштабов.

Ограничения системы

Предполагается, что избиратели будут использовать защищенные устройства для голосования. Несмотря на то что технология блокчейн гарантирует безопасность и объективность процесса голосования, злоумышленник имеет возможность изменить выбор избирателя с помощью вредоносного программного обеспечения, установленного на устройстве голосования. Также особенностью технологии блокчейн является невозможность изменения выбора в случае ошибки пользователя. Избиратель может отдать свой голос, т. е. осуществить выбор, только один раз.

Предлагаемая последовательность осуществления процедуры электронного голосования на базе технологии блокчейн с использованием смарт-контракта

Разработана последовательность осуществления процедуры электронного голосования на базе технологии блокчейн с использованием смарт-контракта (рис. 7). В данной последовательности продуман процесс от прихода избирателя на участок, его аутентификации до голосования за конкретного кандидата. Для

работы подобной системы разработан смарт-контракт, который включает в себя:

1. Структуры (программы) "Голосующий" и "Кандидат". Для реализации функционирования системы структура "Кандидат" содержит поля: имя и подсчет голосов, отданных за данного кандидата. Структура "Голосующий" включает в себя поля для:

- зачисления токена (голоса) после успешной авторизации, для осуществления голосования;
- данных о кандидате, за которого избиратель отдал свой голос;
- полученного хэша избирателя;
- индикатора, голосовал ли данный избиратель.

2. Функции (программы) "Голосования", "Авторизации", "Создания голосования", "Подсчета голосов", "Завершения голосования".

Установка предлагаемой системы на избирательных участках происходит следующим образом: на первом участке вручную запускается genesis block, который создается по описанию, содержащемуся в конфигурационном файле.

Также при создании процедуры голосования в смарт-контракт загружаются:

- список с номерами паспортов избирателей (предоставляет сторонний ответственный орган);
- список кандидатов;
- время проведения голосования.

Далее система генерирует пары вида [номер паспорта, псевдослучайный пин-код].

Голосующий предъявляет паспорт сотруднику избирательной комиссии, и его просят придумать произвольное дополнительное число или слово.

После этого система вычисляет хэш от трех параметров: [номер паспорта, псевдослучайный пин-код, сгенерированный системой, дополнительное число].

Данное дополнительное число (слово) используется в качестве "salt" (соль), для того, чтобы:

- исключить перехват сотрудниками избирательного органа пин-кодов избирателей;
- сделать невозможным подбор злоумышленниками хэша.

Далее полученный хэш автоматически отправляется в смарт-контракт в функцию auth (авторизации), и у пользователя появляется возможность проголосовать. После этого пользователь в терминале голосования вводит свои данные, пин-код, дополнительное слово или код — на основании этих данных считывается хэш и сравнивается с тем, который записан

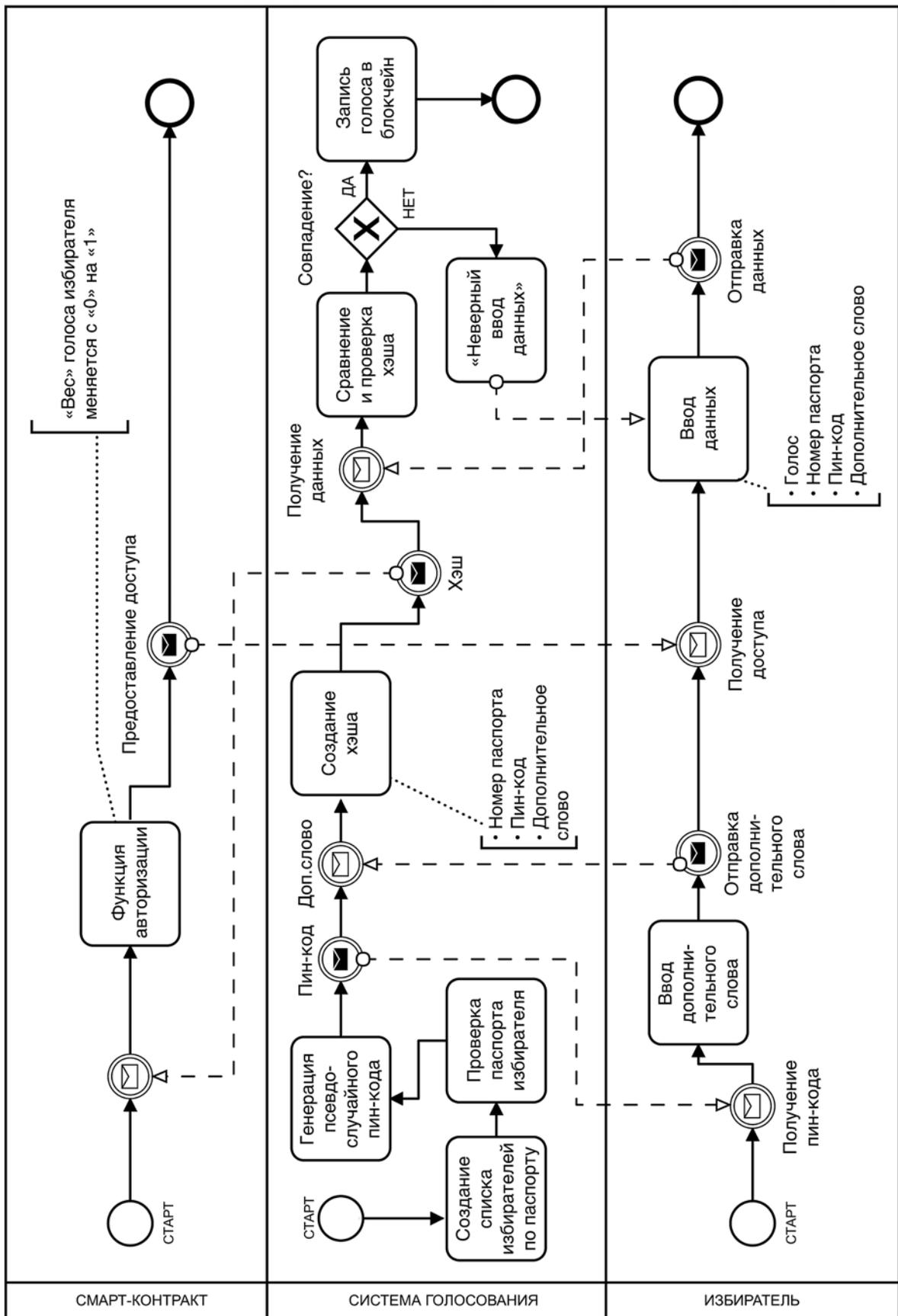


Рис. 7. Предлагаемая последовательность осуществления процедуры электронного голосования на базе технологии блокчейн с использованием смарт-контракта

в смарт-контракт. После полной авторизации он голосует.

При желании разработанную систему голосования можно интегрировать с государственным сервисом gosuslugi ("Госуслуги"), что значительно упростит процесс верификации, и дополнительное число (salt) не будет требоваться. Для этого необходима заблаговременная регистрация каждого участника голосования в сервисе государственных услуг. В таком случае ЦИК обязан предоставлять сервису список с номерами паспортов граждан, имеющих право участвовать в конкретном голосовании, а система государственных услуг должна выдавать пин-код каждому участнику голосования, с помощью которого он сможет пройти идентификацию на избирательном участке.

Программная реализация разработанных алгоритмов

Для работы данной системы голосования необходимо, как минимум, создать структуры и функции в смарт-контракте (рис. 8—13):

- структуры "Голосующий" и "Кандидат" (рис. 8);

Структуры "Голосующий" и "Кандидат"

```
struct Candidate
{
    string name;
    uint voteCount;
}

struct Voter
{
    bool voted;
    uint votedId;
    uint weight;
}
```

Рис. 8. Пример программного кода смарт-контракта, описывающий структуры "Голосующий" и "Кандидат"

- функция авторизации (рис. 9);

Функция авторизации

```
function authorize(string voter){
    require (msg.sender == owner);
    require (!voters[voter].voted);
    voters[voter].weight = 1;
}
```

Рис. 9. Пример программного кода смарт-контракта, функция авторизации

- функция голосования (рис. 10);

Функция голосования

```
function vote(uint votedId){
    require (now<electionEnd);
    require (!voters[msg.sender].voted);
    //TODO: look documentation
    require (votedId>=0);
    require (votedId<=candidates.length);

    voters[msg.sender].voted = true;
    voters[msg.sender].votedId = votedId;

    candidates[votedId].voteCount += voters[msg.sender].weight;
}
```

Рис. 10. Пример программного кода смарт-контракта, функция голосования

- конструктор новых голосований (рис. 11);

Конструктор новых голосований

```
//Конструктор: название выборов, длительность, набор кандидатов
constructor (string _name, uint durationHours, string[] candidateNames){
    owner = msg.sender;
    name = _name;
    //Обратим внимание, now - это время блока!
    electionEnd = now + (durationHours* 1 hours);
    //TODO: look documentation
    for (uint i=0; i<candidateNames.length; i++){
        candidates.push(Candidate(candidateNames[i], 0));
    }
}
```

Рис. 11. Пример программного кода смарт-контракта, функция создания новых голосований

- функция подсчета голосов (рис. 12);

Функция подсчета голосов

```
function votesFor(uint id) view public returns (uint) {
    require (id>=0);
    require (id<candidates.length);
    return candidates[id].voteCount;
}
```

Рис. 12. Пример программного кода смарт-контракта, функция подсчета голосов

- функция завершения процедуры голосования (рис. 13).

Функция завершения процедуры голосования

```
function end(){
    require (msg.sender == owner);
    require (now>=electionEnd);
    for (uint i = 0; i<candidates.length; i++)
    {
        emit ElectionResult(candidates[i].name,candidates[i].voteCount);
    }
}
```

Рис. 13. Пример программного кода смарт-контракта, функция завершения голосования

На этом цикл разработки системы голосования (обзор и анализ аналогов (наличие недостатков) — постановка задачи — разработка концепции — метод — алгоритмы — программы — последовательность осуществления

процедуры электронного голосования на базе технологии блокчейн с использованием смарт-контракта) завершен.

Заключение

На основании обзора систем цифрового голосования и анализа их недостатков разработана функционально полная система электронного голосования и схема проведения выборов на основе технологии блокчейн при использовании смарт-контракта, написанного на языке Solidity и исполняемого в блокчейн-среде Ethereum.

Данная система при последующей доработке и внедрении может позволить создавать и проводить достоверную и прозрачную процедуру голосования, сократить издержки государства на проведение избирательных компаний.

Разработанную систему голосования можно применить во многих случаях, например, в следующих:

1. Выборы президента, мэра города, главы региона, но в этом случае нужно будет дополнительно реализовать систему сетевых узлов для равномерного распределения нагрузки на сеть.

2. Выборы в научных и образовательных учреждениях (выборы в Академии наук, выборы лучшего преподавателя в университете, главы студенческого совета).

3. Муниципальные выборы.

Особенностью результатов данного исследования является тот факт, что систему электронного голосования с предлагаемой структурой при доработке для конкретных задач, а также посредством решения вопросов масштабируемости можно внедрить в работу государственных органов, научных и образовательных учреждений уже в ближайшее время.

Кроме того, предусмотрена возможность интеграции подсистемы авторизации пользователя с существующими государственными электронными услугами.

Список литературы

1. **Barnes A., Brake C., Perry T.** Digital Voting with use of Blockchain Technology. URL: <https://www.economist.com/sites/default/files/plymouth.pdf> (дата обращения: 14.08.18).

2. **Ben Ayed A.** A conceptual Secure Blockchain — Based Electronic Voting System // International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA). 2017. Vol. 9, N. 3. URL: <http://airconline.com/ijnsa/V9N3/9317ijnsa01.pdf> (дата обращения: 14.08.18).

3. **Boucher P.** What if blockchain technology revolutionized voting // European Union. 2016. URL: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2016/581918/EPRS_ATA\(2016\)581918_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2016/581918/EPRS_ATA(2016)581918_EN.pdf) (дата обращения: 14.08.18).

4. **Ethereum** Homestead Documentation (2016) (<http://www.ethdocs.org/en/latest/>) (дата обращения: 14.08.18).

5. **ElGamal T.** A public Key Cryptosystem and a Signature Scheme Based on Discrete Logarithms // IEEE Trans. Info. Theory. 1985. Vol. 31. P. 469—472. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1057074/> (дата обращения: 14.08.18).

6. **Evans D., Paul N.** Election Security: Perception and Reality // IEEE Privacy Magazine. 19.02.04. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1264850/> (дата обращения: 14.08.18).

7. **Gerlach J., Grasser U.** Three Case Studies from Switzerland: E-voting // Berkman Center Research Publication. 02.04.09. URL: <https://www.alexandria.unisg.ch/52680/> (дата обращения: 14.08.18).

8. **Ibrahim S., Kamat M., Salleh M., Aziz S. R. A.** Secure E-Voting with Blind Signature // Proceeding of the 4th National Conference of Communication Technology. 14.01.03. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1188334/> (дата обращения: 14.08.18).

9. **Jan J., Chen Y., Lin Y.** The Design of Protocol for e-Voting on the Internet // Proceedings IEEE 35th Annual 2001 International Carnahan Conference on Security Technology. 19.10.01. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/962831/> (дата обращения: 14.08.18).

10. **Lubin J.** How Blockchain Will Disrupt Our Election System // Internet resource "Futurism". 7.11.2016. URL: <https://futurism.com/how-blockchain-will-disrupt-our-election-system/> (дата обращения: 14.08.18).

11. **Nakamoto S.** A Peer-to-Peer Electronic Cash System. // The Cryptography Mailing list. 31.10.08. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (дата обращения: 14.08.18).

12. **Крупные** российские банки "входят во вкус" технологии блокчейн. 2017. URL: <https://ria.ru/economy/20170727/1499301891.html> (дата обращения: 14.08.18).

13. **Поляков К.** Как власти Москвы внедряют блокчейн в городские проекты. URL: <https://rb.ru/opinion/blockchain-moscow/> (дата обращения: 14.08.18).

14. **"РосЕвроБанк"** разработал прототип системы удаленной идентификации клиентов на базе технологии блокчейн от Microsoft. 2017. URL: <https://news.microsoft.com/ru-ru/rosevrobank-razrabotal-prototip-sistemy-udalennoj-identifikatsii-klientov-na-baze-tehnologii-blokchejn-ot-microsoft/> (дата обращения: 14.08.18).

The Concept of Electronic Voting Based on Blockchain

In modern democratic digitalized society the topicality of open and objective elections with the use of innovative information technology grows. Existing solutions of practically used voting systems are concentrated on technical and law problems instead of using innovative information technologies on the stage of the voting itself. The article analyzes problems of modern election systems, and offers reasonable methods, algorithms and software implementation of voting system based on blockchain technology with with special software implementation of smart-contracts in which flaws of existing systems are eliminated.

Keywords: innovative information technology, blockchain, smart-contract, electronic voting, voting system

DOI: 10.17587/it.25.75-85

References

1. **Barnes A., Brake C., Perry T.** Digital Voting with use of Blockchain Technology, available at: <https://www.economist.com/sites/default/files/plymouth.pdf> (date of access: 14.08.18).

2. **Ben Ayed A.** A conceptual Secure Blockchain — Based Electronic Voting System, *International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA)*, 2017, vol. 9, no. 3, available at: <http://airconline.com/ijnsa/V9N3/9317ijnsa01.pdf> (date of access: 14.08.18).

3. **Boucher P.** What if blockchain technology revolutionized voting, European Union, 2016, available at: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2016/581918/EPRS_ATA\(2016\)581918_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2016/581918/EPRS_ATA(2016)581918_EN.pdf) (date of access: 14.08.18).

4. **Ethereum** Homestead Documentation, 2016, available at: (<http://www.ethdocs.org/en/latest/>) (date of access: 14.08.18).

5. **ElGamal T.** A public Key Cryptosystem and a Signature Scheme Based on Discrete Logarithms, *IEEE Trans. Info. Theory*, 1985, vol. 31, pp. 469—472, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1057074/>) (date of access: 14.08.18).

6. **Evans D., Paul N.** Election Security: Perception and Reality, *IEEE Privacy Magazine*, 19.02.04, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1264850/> (date of access: 14.08.18).

7. **Gerlach J., Grasser U.** Three Case Studies from Switzerland: E-voting, Berkman Center Research Publication, 02.04.09, available at: <https://www.alexandria.unisg.ch/52680/> (date of access: 14.08.18).

8. **Ibrahim S., Kamat M., Salleh M., Aziz S. R. A.** (2003) Secure E-Voting with Blind Signature, *Proceeding of the 4th National Conference of Communication Technology*, 14.01.03, available

at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1188334/> (date of access: 14.08.18).

9. **Jan J., Chen Y., Lin Y.** The Design of Protocol for e-Voting on the Internet, *Proceedings IEEE 35th Annual 2001 International Carnahan Conference on Security Technology*. 19.10.01. (<https://ieeexplore.ieee.org/document/962831/>) (date of access: 14.08.18).

10. **Lubin J.** How Blockchain Will Disrupt Our Election System // *Internet resource "Futurism"*, 7.11.2016, available at: <https://futurism.com/how-blockchain-will-disrupt-our-election-system/> (date of access: 14.08.18).

11. **Nakamoto S.** A Peer-to-Peer Electronic Cash System // The Cryptography Mailing list, 31.10.08, available at: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (date of access: 14.08.18).

12. **Krupnye rossijskie banki "vhodât vo vkus" tehnologii blokčejn** (Large Russian banks "get into the taste" of the blockchain technology), 2017, available at: <https://ria.ru/economy/20170727/1499301891.html> (date of access: 14.08.18) (in Russian).

13. **Polâkov K.** *Kak vlasti Moskvy vnedrât blokčejn v gorodskie proekty* (How Moscow authorities are introducing the blockchain into urban projects), available at: <https://rb.ru/opinion/blockchain-moscow/> (date of access: 14.08.18) (in Russian).

14. **"RosEvroBank" razrabotal prototip sistemy udalenoj identifikacii klientov na baze tehnologii blokčejn ot Microsoft** ("RosEvroBank" developed a prototype of the remote client identification system based on the Microsoft blockchain technology), 2017, available at: <https://news.microsoft.com/ru-ru/rosevrobank-razrabotal-prototip-sistemy-udalenoj-identifikatsii-klientov-na-baze-tehnologii-blokčejn-ot-microsoft/> (date of access: 14.08.18) (in Russian).

С. С. Касаткин, аспирант, antimaterialny@rambler.ru,

В. Т. Калайда, д-р техн. наук, проф., kvt@ioa.ru,

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Метод и реализация системы формализации описания класса изображений методами непараметрической статистики

Рассматривается задача формализации описания класса изображений лица человека. Исследования направлены на поиск методов, повышающих точность описания для задач распознавания. Кратко рассматриваются существующие методы описания. Предлагается методика, позволяющая уменьшить суммарные ошибки первого и второго рода при описании классов изображений на основе функции плотности вероятности.

Ключевые слова: формализованное описание, класс изображений, непараметрическая статистика, коэффициент размытия, метод Нелдера—Мида, математическое программирование

Введение

Системы распознавания лиц представляют собой цифровые программы для автоматической идентификации или верификации человека с сигнала, представленного цифровым изображением или видеопотоком. Поскольку среда и используемые средства регистрации вносят искажения в сигнал, то изображение можно рассматривать как случайное поле. Под классом будем понимать множество реализаций одного и того же образа. Примером являются изображения одного человека, полученные в различных условиях (освещение, ракурс наблюдения, мимика и пр.).

Аппаратные искажения сигнала могут быть компенсированы за счет использования в качестве формализованного описания вектора параметров (например, моментов), инвариантных к аффинным искажениям [1–3]. Однако ошибки, обусловленные средой передачи сигнала, компенсировать сложнее. Для описания класса в этом случае удобно использовать плотность вероятности распределения параметров вектора, описывающего элемент класса [4–6].

Так как в прикладных системах видеонаблюдения и контроля проблематично получить "достаточное" число наблюдений и сложно априори сделать предположение о виде функции плотно-

сти вероятности, то для ее восстановления целесообразно использовать непараметрическую форму представления [4–10]. Данный подход не использует явно гипотезу о виде функции распределения. Еще одним преимуществом непараметрического подхода является наличие в таких функциях плотности вероятности свободных параметров (параметров размытия), изменением которых можно регулировать меру приближения к сформулированным требованиям (повышение точности описания) [4–7].

Сжатое описание некоторых методов формализованного описания класса можно найти в работах [11, 12]. Описание методов описания изображений представлено в работах [13–21].

Исходя из вышесказанного, для описания класса изображений целесообразно использовать методы непараметрической статистики. В качестве меры точности описания будем использовать суммарные ошибки первого и второго рода.

1. Формализация описания класса

Формализацию описания изображений предлагается решать на базе понятия *класса изображений* (образов) — множества изображений лиц одного и того же человека, полу-

ченных при различных условиях съемки (угол, мимика, освещение и пр.).

Описание класса образов может быть выполнено на основе следующих методов:

- 1) k -ближайших соседей [11, 12];
- 2) разделяющей гиперповерхности [11, 12];
- 3) опорной гиперповерхности [11, 12];
- 4) с использованием функции плотности вероятности [10, 12].

Подходы на основе метода *ближайших соседей* определяют метрики, по которым векторы характеристик сравниваются один к одному, т. е. для каждого изображения из исходной обучающей базы, представленного в виде вектора характеристик, заранее заданной метрикой определяется "мера близости" с вектором характеристик распознаваемого изображения. Основным недостатком методов данного подхода заключен в самой идее. При реализации методов данной группы необходимо хранить информацию о каждом экземпляре каждого класса, с которым будет происходить сравнение, на каждом этапе процесса распознавания. Таким образом, методы k -ближайших соседей являются затратными с точки зрения ресурсов обрабатывающей системы [11]. В зависимости от способа реализации это могут быть как затраты оперативной памяти, так и затраты, связанные со сложностью алгоритма в целом за счет необходимости считывать каждый образ из удаленного хранилища. При попытке уменьшить объем хранимой информации путем удаления непрезентабельных векторов или выделения некоторого числа наиболее значимых встает нетривиальная задача анализа многомерных данных и выделения наиболее существенных [11]. Данный метод в общем виде представлен в работе [15]. В работе [12] приведены такие методы, как метод дробящихся эталонов, метод ближайших соседей, правило ближайшего соседа. В работе [20] представлен основной недостаток данного подхода в виде трудоемкости сравнения образов один к одному. В работе [22] в качестве меры близости рассматривается угол между двумя векторами. Классификатор по ближайшему среднему представлен в работе [23]. Другие примеры эталонных векторов и классификаторов на основе меры близости могут быть найдены в работах [24–31].

Метод разделяющей гиперповерхности основывается на переводе исходных векторов

в пространство более высокой размерности и поиске границы с максимальным "зазором" в этом пространстве. Таким образом, например в одномерном случае, по обеим сторонам гиперплоскости строятся две параллельных гиперплоскости, отделяющие класс и определяющие его область определения. Недостаток методов данной группы состоит в том, что они не гарантируют непересечения различных классов. В связи с этим в пространстве признаков возникают зоны, в которых трудно принять решение о принадлежности к конкретному классу и сложности поиска оптимальных разделяющих гиперповерхностей. Теоретические основы метода разделяющей гиперповерхности рассматриваются в работе [32] на примере линейных и квадратичных разделяющих поверхностей.

Метод опорной гиперповерхности основан на использовании минимально отклоняющейся от множества векторов, описывающих образы одного класса, кривой в пространстве признаков. Наиболее часто применяемым методом данной группы является метод минимальных квадратов. При реализации метода в реальных системах идентификации необходимо решить следующие две задачи: оценить порядок полинома опорной гиперповерхности, выделить существенные переменные полинома. Поскольку вклад каждого одночлена полинома будет различен, то необходимо выделить группу одночленов, вносящих наибольший вклад в дисперсию, исключив из полинома остальные. Методы опорной гиперповерхности нацелены на максимизацию отклика на образы своего класса, но никак не минимизируют отклик на элементы других. Кроме того, сложность методов данной группы значительно выше методов разделяющей гиперповерхности.

Метод с использованием функции плотности вероятности позволяет наиболее полно описать класс образов, представленный набором векторов случайных величин. Основная идея заключается в предположении, что опорная гиперповерхность есть аппроксимация лишь участка плотности вероятности векторов, описывающих изображения класса. Кроме того, методы данной группы позволяют решать основные проблемы предыдущих подходов. Функция плотности вероятности позволяет реализовать сравнение один ко многим, когда идентифицируемый образ проходит верификацию не с каждым изображением из каждого класса, но

определяется метрика, позволяющая рассчитать "меру близости" распознаваемого образа с каждым классом, представленным в обучающей выборке целиком (например, метрика максимального правдоподобия). При этом класс рассматривается как единая сущность. Данный метод позволяет статистически обоснованно подойти к определению класса, к которому принадлежит идентифицируемый объект в зонах неопределенности, а также минимизировать эту область и отклик на элементы другого класса за счет уменьшения суммарных ошибок первого и второго рода. Достаточно прост в реализации. Функция плотности вероятности на основе метода потенциальной функции представлена в работе [12]. В работе [26] данный подход представлен байесовским классификатором. Наивный байесовский классификатор рассматривается в работе [32]. Также данный подход рассматривается в источниках [31–35]. В работе [28] рассмотрен байесовский линейный классификатор. Другие исследования байесовского классификатора могут быть найдены в работах [23, 31, 34, 35, 37, 39, 44, 46–51].

Стоит отметить значительные достижения в задачах распознавания образов, полученные при использовании методов вычислительных (нейронных) сетей. Исследование и примеры применения нейронных сетей представлены в работах [24, 25, 31, 41–45]. Вычислительные сети не требуют предварительной подготовки изображений, самостоятельно редуцируют пространство признаков, позволяя хранить в памяти не информацию об изображениях, а только саму структуру сети [40].

Вместе с тем в настоящее время работа с методами данной группы сопряжена с рядом нерешенных проблем (не формализован этап выбора архитектуры, что по вычислительным затратам сопоставимо с методом перебора, высокая требовательность к ресурсам исполняющей системы, переобучение, неинтерпретируемость результатов и, как следствие, непредсказуемость работы на реальных данных после этапа обучения), и попытки решения задач распознавания методами данной группы будут упираться в попытки решить проблемы вычислительных сетей, что не является частью задачи, решаемой в данной работе.

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что наиболее перспективными методами в задачах распознавания образов

являются методы на основе использования функции плотности вероятности. На первом этапе для применения методов данной группы необходимо получить устойчивое к проективным и аффинным преобразованиям описание отдельного изображения.

2. Получение инвариантных характеристик

Выбор эффективных признаков — одна из базовых задач теории распознавания. Универсального решения, определяющего порядок отыскания оптимальных характеристик для описания изображения, до сих пор не найдено. Основным способом описания остается автоматизированный выбор признаков из некоторого заранее заданного на основе эвристических множества свойств. От результатов решения этой задачи зависят процент ошибок на каждом этапе распознавания изображения, быстрота обработки и объем затрачиваемой при расчетах памяти. Основными требованиями к признакам являются:

- 1) информативность;
- 2) небольшой объем вычислений;
- 3) помехоустойчивость;
- 4) инвариантность к аффинным преобразованиям;
- 5) реализуемость.

В источнике [13] рассмотрены такие методы, как метод гибкого графа, нейронные сети, скрытые марковские модели, метод главных компонент, активные модели внешнего вида, их плюсы и минусы, а также основные проблемы при распознавании лиц людей. Выделяются два основных подхода к описанию изображений и уменьшению пространства признаков — структурный и статический [9]. Структурный подход сводится к описанию образа через выделение и описание отношений тех или иных элементов на изображении. Может быть подразделен на фрактальный, геометрический, структурный и модельный подходы.

Фрактальный при анализе вычисляет фрактальные характеристики. Подход рассмотрен в работе [14] на примере задачи распознавания дорожных знаков в видеопотоке. Обзор по фрактальному подходу к описанию текстур проведен в работе [19].

Геометрический подход воспринимает изображение как составленное из элементарных примитивов. Представлен в работах [15–17].

Структурный подход предполагает, что изображение состоит из простых и почти регулярно повторяющихся текстурных примитивов. В работах [15, 36] этот подход рассмотрен на примере эластичных графов. Подход рассмотрен также в работе [38]. Обнаружение и идентификация объектов на основе их структурных описаний представлены в источнике [18]. Обзор по структурному подходу к описанию текстур проведен в работе [19].

Модельный подход сводится к построению некоторой модели, описывающей реальный объект. В источнике [15] подход рассмотрен на примере гибких контурных моделей, в работе [20] представлен классификатор с сильной вариабельностью формы на базе полиномиальной и марковской моделей контура.

Статистический подход трактует изображение как реализации некоторого случайного процесса. Примерами статистического подхода при формализации описания изображения являются вычисление углового момента, алгебраических моментов, контрастности, энтропии, корреляции и ряд других. Главным недостатком всех структурных методов является высокая сложность структуры, описывающей исходный образ, и необходимость в выработке специализированных методик сравнения, тогда как статистический подход позволяет представлять описание изображения в виде вектора случайных величин и применять широкий набор статистических методик. Обзор по статистическому подходу к описанию текстур проведен в работе [19]. Статистический подход как общий подход и методы распознавания рассмотрены в работах [21, 38].

Во множестве современных работ, посвященных распознаванию, используется статистический подход, а именно интегральное описание изображений. К достоинствам такого описания относят: сравнительную простоту его получения, легкость наращивания ансамбля свойств, высокую помехозащищенность. Одними из наиболее перспективных методов интегрального описания являются методы на основе инвариантных алгебраических моментов на основе полиномов Цернике и Лежандра [1–3], главным достоинством которых, по сравнению с центральными моментами, является их инвариантность относительно аффинных преобразований.

Моменты Цернике принадлежат классу ортогональных моментов и используются, чтобы моменты соответствовали независимым характеристикам объекта в пространстве.

Для обеспечения инвариантности к сдвигу начало координат для вычисления устанавливается в точку "центра масс" изображения. Точка центра масс определяется по следующей формуле:

$$(x_c; y_c) = \begin{pmatrix} \frac{m_{10}}{m_{00}}; \frac{m_{01}}{m_{00}} \end{pmatrix},$$

где m_{pq} — геометрические моменты:

$$m_{pq} = \iint x^p y^q f(x, y) dx dy.$$

Величину m_{00} можно интерпретировать как полную "массу" изображения.

Моменты Цернике ZM_{nm} , определенные на единичном круге $0 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq 1$, вычисляются по формуле для дискретного случая:

$$ZM_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M f(x, y) [V_{nm}(x, y)]^*;$$

$$V_{nm} = Z_{nm}(x, y) \exp\left(i \cdot \arctg\left(\frac{y}{x}\right)\right);$$

$$Z_{nm}(x, y) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} (-1)^k \times$$

$$\times \frac{(n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} (x^2 + y^2)^{\frac{n-2k}{2}},$$

где n — порядок момента; m — порядок гармоники; $n \in N^+$, $|m| \leq n$, $(n - |m|)$ четное, символом * обозначается комплексное сопряжение; ZM_{nm} — комплексные моменты Цернике; Z_{nm} — полиномы Цернике; V_{nm} — базисные функции, по которым происходит разложение изображения.

Модули векторов моментов Цернике инвариантны к повороту:

$$|ZM_{nm}^{ROTATED}| = |ZM_{nm}|.$$

Векторы признаков Цернике порядка N формируются согласно формуле

$$ZMI_N = \left(\frac{|ZM_{11}|}{m_{00}}, \frac{|ZM_{20}|}{m_{00}}, \frac{|ZM_{22}|}{m_{00}}, \dots, \frac{|ZM_{NN}|}{m_{00}} \right)^T.$$

Каждая компонента вектора признаков делится на массу изображения m_{00} , которая пропорциональна его размеру и обеспечивает инвариантность объекта к изменению масштаба.

Таким образом, с помощью инвариантных моментов Цернике может быть получен набор характеристик, пригодных для инвариантного относительно аффинных преобразований описания одиночного изображения.

3. Восстановление функции плотности вероятности

Поскольку применение методов на основе функции распределения требует наличия априорной функции распределения, далее необходимо определиться с методом восстановления функции плотности вероятности.

В настоящее время существуют два направления методов восстановления функции плотности распределения случайной величины по эмпирическим данным. Кратко рассмотрим эти подходы.

1. *Параметрический подход* реализуется в случаях, когда вид распределения известен заранее и по обучающему набору необходимо сделать оценку значений этих параметров. Имеет несколько существенных недостатков, основными из которых являются следующие:

- делается предположение о виде распределения неизвестной случайной величины;
- параметрические методы являются усредняющими по выборке случайных величин.

2. *Непараметрический подход* не использует явно гипотезу о виде распределения, элементы выборки считаются независимыми случайными величинами с одинаковым распределением [4].

Для выбора наиболее оптимального с точки зрения точности описания метода восстановления функции был проведен эксперимент по восстановлению плотности вероятности параметрическим и непараметрическим методами. Генерировалась выборка, распределенная по нормальному закону. Далее оценивались параметры параметрического распределения и непараметрического метода Парзена—Розенблатта. Затем критерием Пирсона оценивалось соответствие восстановленных функций гистограмме, построенной по исходным данным. На основании тестирования выявлено, что нормированное значение критерия Пирсона для

параметрически восстановленной функции в среднем на 20 % хуже, чем для функции, восстановленной методом Парзена—Розенблатта.

Для формализованного описания класса плотностью вероятности в байесовские функции подставим непараметрические оценки Розенблатта—Парзена:

$$\bar{p}(x) = \frac{1}{Mc} \sum_{i=1}^M \Phi\left(\frac{x - x^i}{c}\right),$$

где Φ — ядро (четная, нормированная функция); c — коэффициент размытости; M — число наблюдений (число изображений).

Из байесовской решающей функции следует, что исследуемый образ принадлежит тому классу, плотность вероятности которого больше.

Параметрами данной модели является вектор коэффициентов размытия для функций плотностей вероятностей. Тогда задача построения решающего правила сводится к оцениванию $N \times D$ параметров, где N — число классов; D — размерность пространства признаков.

В современных работах для упрощения задачи оптимизации принимается, что коэффициент размытия представляется в виде произведения некоторого общего коэффициента и оценок среднеквадратических отклонений:

$$c_d = c \sigma_d, \quad d = \overline{1, D}.$$

Оценки среднеквадратических отклонений для каждого признака в классах можно записать следующим образом:

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M \left(x_d^i - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_d^i\right)^2}, \quad d = \overline{1, D}.$$

Тогда непараметрические оценки плотности вероятности при синтезе решающего правила в многомерном пространстве примут вид:

$$p_t = \left(M \prod_{v=1}^D c_v\right)^{-1} \sum_{i=1}^M \prod_{v=1}^D \Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v}\right), \quad t = \overline{1, N},$$

где d — индекс коэффициента размытия; N — число классов; M — число изображений для класса.

Таким образом, задача оптимизации непараметрического решающего правила сводится к поиску одного оптимального общего коэффициента. Подробно изложение метода можно найти в работе [10].

Однако принятие идеи, что коэффициенты размытия могут быть найдены через произведение общего коэффициента на соответствующие среднеквадратичные отклонения, предполагает, что исходная выборка репрезентативна, а также, что распределение параметров симметрично относительно общего коэффициента. К сожалению, в реальных задачах нельзя гарантировать, что эти утверждения верны. Таким образом, использование общего коэффициента размытия может привести к пересечениям функций плотности вероятностей, в то время как этого можно было бы избежать (или по крайней мере значительно снизить значения суммарных ошибок первого и второго рода), если использовать альтернативные методы поиска параметров оптимизируемой функции [4].

4. Оценка коэффициента размытия

Поскольку восстановленные плотности вероятности, в зависимости от выбранных ядерных функций (например, треугольная), могут иметь разрывы первого рода, необходимо использовать безградиентные методы, не вычисляющие производные (методы нулевого порядка), например методы: Хука — Дживса, Розенброка, Нелдера — Мида, Пауэлла.

Ни один из алгоритмов не оказался значительно лучше с точки зрения поиска минимума, выбор метода определяется конкретной задачей и опытом исследователя [52]. Метод Хука—Дживса в случае сильно вытянутых, изогнутых или обладающих острыми углами линий уровня целевой функции может оказаться неспособным обеспечить продвижение к точке минимума. Эффективность метода Розенброка зависит от выбора начальной точки поиска экстремума. Для метода Пауэлла так же, как предыдущих, число проб целевой функции линейно растет при увеличении размерности пространства, что негативно сказывается на эффективности при минимизации сложной целевой функции [52]. Метод Нелдера — Мида на каждой итерации алгоритма, как правило, один-два раза вычисляет значения функции, что чрезвычайно эффективно. В связи с этим для оценки коэффициентов размытия без потерь в точности целесообразно с точки зрения алгоритмической сложности использовать алгоритм Нелдера — Мида.

В качестве целевой функции используем суммарную ошибку первого и второго рода для

плотностей вероятностей, восстановленных непараметрическим методом:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1+1}^{n-1} (p_{i,j}^1(c) + p_{i,j}^2(c)) \rightarrow \min,$$

где n — число классов; $p_{i,j}^1(c)$ — ошибка первого рода для i и j классов; $p_{i,j}^2(c)$ — ошибка второго рода для i и j классов.

Для обеспечения непрерывности функций в области определения начальное значение коэффициента размытия установим равным половине максимального значения стандартной девиации для интервала:

$$c_d^0 = \max_j \left(\frac{\max_i (x_{i,d}^j - x_{i-1,d}^j)}{2\sigma_d^j} \right),$$

$$j = \overline{1, N}, i = \overline{2, M}, d = \overline{1, D},$$

где d — индекс коэффициента размытия; i — индекс изображения внутри класса; j — индекс класса; N — число классов; M — число изображений для класса; D — длина вектора коэффициентов размытия (размерность пространства признаков); σ_d^j — среднеквадратичное отклонение значений характеристик для класса с индексом j и коэффициентом размытия с индексом d .

Для обеспечения этого условия в целевую функцию вводится штраф $e(c)$:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1+1}^{n-1} (p_{i,j}^1(c) + p_{i,j}^2(c)) + e(c) \rightarrow \min;$$

$$e(c) = \begin{cases} 1, \exists (c_d - c_d^0 < 0), & d = \overline{1, D}, \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

где c_d^0 — стартовое, минимальное значение коэффициента размытия; d — индекс коэффициента размытия.

5. Программная реализация

Формулировка задачи: для подготовленной базы изображений, где каждое изображение помечено группой, к которой оно принадлежит, необходимо найти такое описание, которое минимизирует суммарную ошибку первого и второго рода. В этом случае программная система должна реализовывать следующие функции:

1) расчет инвариантных характеристик (CID — calculate invariant description);

- 2) расчет коэффициентов размытия (СВС — calculate blur coefficients);
- 3) расчет суммарной ошибки первого и второго рода (СТЕ — calculate total error);
- 4) проверка критерия останова (ОС — out criteria).

Функция расчета вектора инвариантных характеристик (CID) применяет моменты Цернике для инвариантного относительно аффинных и проективных преобразований описания изображений в виде вектора характеристик. На вход подаются сгруппированные по принадлежности к классу изображения. Выход данной функции — набор векторов инвариантных характеристик, описывающих изображение, сгруппированных по принадлежности к классу. Выход данной функции подается на вход функции расчета коэффициентов размытия.

Функция расчета коэффициентов размытия по формуле для c_d^0 рассчитывает стартовое значение первой стартовой точки для симплекса. Все остальные находятся путем смещения на заданный шаг найденной ранее точки по одной не смещенной ранее координате. Смещение происходит строго в положительную сторону. Выходом функции будет упорядоченный набор векторов коэффициентов размытия, соответствующий порядку классов изображений.

Главной функцией является расчет суммарных ошибок первого и второго рода. Входом функции будут наборы изображений, сгруппированные по принадлежности к классу распознаваемых образов, а также наборы векторов коэффициентов размытия. На выходе получим

минимальную достигнутую суммарную ошибку первого и второго рода для заданных классов изображений и коэффициентов размытия. Выход функции поступает в функцию проверки критерия останова.

Проверка критерия останова сводится к сравнению суммарной ошибки первого и второго рода с заданным минимальным значением. Если условия выполнены, то результат достигнут. В противном случае деформируется симплекс, состоящий из векторов коэффициентов размытия и подается в функцию СТЕ.

Диаграмма деятельности в нотации UML для программной реализации на основе выделенных функций представлена на рисунке.

6. Результаты расчетов

В задаче описания массива изображений в качестве векторного описания изображения используются девять инвариантных моментов Цернике:

$$\{m_{1,1}, m_{2,0}, m_{2,2}, m_{3,3}, m_{4,0}, m_{4,2}, m_{4,4}, m_{6,0}, m_{6,4}\}.$$

По полученным наборам векторов восстанавливалась функция плотности вероятности. При этом были использованы классический подход [9] и метод на основе оптимизации Нелдера—Мида. Для этих плотностей вероятностей оценивались суммарные ошибки первого и второго рода.

В качестве классов изображений были использованы:

1) CMU AMP face expression (13 классов изображений лиц людей по 75 полутоновых изображений разрешением 64×64 каждая. Общее число изображений равно 975);

2) Georgia Tech face (50 классов изображений лиц людей по 15 цветных изображений различного размера. Общее число изображений равно 750).

Результаты расчетов представлены в таблице.

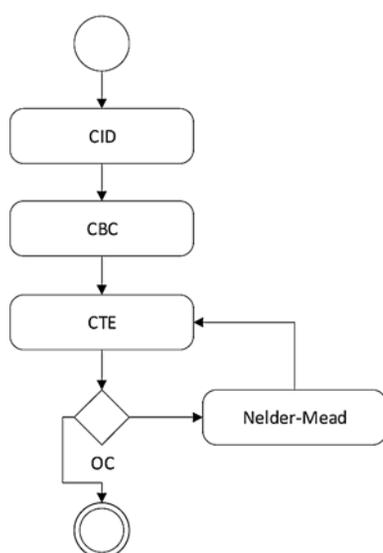


Диаграмма деятельности UML

Сравнение суммарных ошибок

Метод оценки	Суммарная ошибка	
	CMU AMP	Georgia Tech
Классический	$1,04 \cdot 10^{-9}$	0,023
Нелдера—Мида	$4,49 \cdot 10^{-10}$	0,009

Заключение

На основании представленных результатов расчетов можно сделать предположение о том, что оптимизация индивидуальных коэффициентов размытия методами нулевого порядка вместо оптимизации общего коэффициента размытия позволяет уменьшить суммарные ошибки первого и второго рода на порядок.

Список литературы

1. Касаткин С. С., Калайда В. Т. Программная система для вычисления формализованных характеристик полутонового изображения, не зависящих от условий съемки // Научная сессия ТУСУР—2014. Ч. 4. 2014. С. 47—49.
2. Тарбаев Б. Б., Калайда В. Т. Разработка алгоритма программной системы формализованного описания полутоновых изображений, инвариантных к аффинным преобразованиям // Матер. Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР—2014". Ч. 4. 2014. С. 52—45.
3. Abdul Kadir, Lukito Edi Nugroho, Adhi Susanto, P. Insap Santosa. Experiments of zernike moments for leaf identification // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 15 July 2012. Vol. 41, N. 1. P. 82—93.
4. Калайда В. Т., Тарбаев Б. Б., Касаткин С. С. Распознавание полутонового изображения лица на основе формализации описания класса непараметрическими статистиками // Мир науки и инноваций. 2016. Т. 10, № 1 (3). С. 44—56.
5. Касаткин С. С., Калайда В. Т. Идентификация полутонового изображения лица человека // Научная сессия ТУСУР—2015. Ч. 2. 13—15 мая 2015. С. 205—208.
6. Тарбаев Б. Б., Калайда В. Т. Вычисление формальных инвариантных признаков, описывающих изображение // Матер. Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР—2015. Ч. 2. 2015. С. 244—247.
7. Агеева Н. М., Антонов В. Н., Калайда В. Т. и др. Наука и инновации в современном мире: техника и технологии. В 3 книгах. Кн. 3. Одесса: Куприенко С. В., 2017. 157 с.
8. Касаткин С. С., Калайда В. Т. Анализ методов распознавания изображений // Наука и инновации в современном мире: техника и технологии. 2017. Т. 3. С. 110—116.
9. Kasatkin S. S. The methods of pattern recognition: A Review // АПР: Труды Международной молодежной научной школы. 25—26 сентября 2017. С. 128—131.
10. Лапко А. И., Лапко В. А. Непараметрические модели и алгоритмы обработки информации: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. 220 с.
11. Калайда В. Т., Елизаров А. И. Метод опорной гиперповерхности для идентификации изображения лица человека // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 5. С. 65—70.
12. Волошин Г. Я. Методы распознавания образов (конспект лекций). URL: http://abc.vvsu.ru/Books/Metody_r/default.asp (дата обращения: 07.06.2018).
13. Анализ существующих подходов к распознаванию лиц. URL: <http://habrahabr.ru/company/synesis/blog/238129/> (дата обращения: 18.08.2018).
14. Минаев Е. Ю., Никоноров А. В. Детектирование и распознавание объектов в системах автомобильной безопасности на основе фрактального анализа // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, № 1. С. 124—130.

15. Выделение и распознавание лиц. б.д. URL: http://wiki.technicalvision.ru/index.php/выделение_и_распознавание_лиц (дата обращения: 18.08.2018).
16. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: МИР, 1976. С. 509.
17. Бутенков С. А. Обобщенные геометрические модели и многоуровневый анализ изображений в интеллектуальных системах // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2003. С. 21—28.
18. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В., Ососков М. В., Моржин А. В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. М.: Физматкнига, 2010. 689 с.
19. Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений. Санкт-Петербург: ИТМО, 2008. 195 с.
20. Фурман Я. А., Юрьев А. Н., Яншин В. В. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений. Красноярск: Изд. Краснояр. ун-та, 1992. 248 с.
21. Лифшиц Ю. Статистические методы распознавания образов. Лекции. URL: <http://yury.name/modern/07modernnote.pdf> (дата обращения: 18.08.2018).
22. Немировский В. Б., Стоянов А. К. Распознавание нечетких дубликатов изображений, основанное на ранговом распределении мощностей кластеров яркости // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 4. С. 811—817.
23. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. 752 с.
24. Брилюк Д., Старовойтов В. Распознавание человека по изображению лица нейросетевыми методами. URL: <http://www.masters.donntu.org/2008/kita/baglikov/library/4.htm> (дата обращения: 18.08.2018).
25. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
26. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1978. 416 с.
27. Верхаген К., Дейн Р., Грун Ф. Распознавание образов: состояние и перспективы. М.: Радио и связь, 1985. 117 с.
28. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: Наука, 1979. 368 с.
29. Загоруйко Н. Г. Методы распознавания и их применение. М.: Книга по Требованию, 2012. 221 с.
30. Чанышев О. Г. Курс лекций "Введение в ИИ". Часть II. Распознавание образов. Лекция 13. Алгоритмы распознавания образов. URL: <http://deadbeef.narod.ru/work/docs/ai/11.pdf> (дата обращения: 18.08.2018).
31. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
32. Воронцов К. В. Лекции по статистическим (байесовским) алгоритмам классификации. Лекции URL: <http://www.ccas.ru/voron/download/Bayes.pdf> (дата обращения: 18.08.2018).
33. Мокеев В. В., Томилов С. В. О решении задачи распознавания изображений методом главных компонент и линейным дискриминантным анализом // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 4. С. 871—880.
34. Вапник В. Н., Червоненкис А. Я. Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения). М.: Наука, 1974. 416 с.
35. Волошин Г. Я., Бурлаков И. А., Косенкова С. Т. Статистические методы решения задач распознавания, основанные на аппроксимационном подходе. Владивосток: Изд. Тихоокеан. океанол. ин-т. ДВО РАН, 1992. С. 260—270.
36. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. М.: МИР, 1977. 20 с.
37. Апраушева Н. Н., Сорокин С. В. Заметки о гауссовых смесях. М.: ВЦРАН, 2015. 145 с.

38. Харалик Р. М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. 1979. Т. 67, № 5.
39. Патрик Э. А. Основы теории распознавания образов. М.: Советское радио, 1980. 407 с.
40. Болотова Ю. А., Спицын В. Г., Рудометкина М. Н. Распознавание автомобильных номеров на основе метода связанных компонент и иерархической временной сети // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 2. С. 275—280.
41. Лукьяница А. А., Шишкин А. Г. Цифровая обработка видеоизображений. М.: Ай-Эс-Эс Пресс, 2009. 518 с.
42. Савченко А. В. Распознавание изображений на основе вероятностной нейронной сети с проверкой однородности // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37, № 2. С. 254—262.
43. Кирюшина А. Е. Распознавание математических символов с использованием сверточной нейронной сети // Наукоемкие информационные технологии. 2013. С. 5.
44. Местецкий Л. М. Математические методы распознавания образов. Курс лекций. М.: Изд. МГУ, 2004. 85 с.
45. Солдатова О. П., Гаршин А. А. Применение сверточной нейронной сети для распознавания рукописных цифр // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 2. С. 252—259.
46. Грешилов А. А. Математические методы принятия решений. М.: МГТУ, 2014. 647 с.
47. Кузнецов А. В., Мясников В. В. Сравнение алгоритмов управляемой поэлементной классификации гиперспектральных изображений // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 3. С. 494—502.
48. Савченко А. В. Выбор параметров алгоритма распознавания изображений на основе коллектива решающих правил и принципа максимума апостериорной вероятности // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, № 1. С. 116—123.
49. Горелик А., Скрипкин В. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1984. 208 с.
50. Лапко А. И., Лапко В. А. Регрессионная оценка плотности вероятности и ее применение // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ. 2014. С. 1101—1107.
51. Соيفер В. А. Методы компьютерной обработки изображений. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
52. Хмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с.

S. S. Kasatkin, Postgraduate Student, e-mail: antimaterialny@rambler.ru,
V. T. Kalajda, D. Sc., Professor, e-mail: kvt@ioa.ru,
National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

Method and Implementation of the Formalization System for Describing the Class of Images using Nonparametric Statistics

The paper deals with the task of formalizing the description of a class of images of a person's face. The research is aimed at finding methods that increase the accuracy of the description for recognition problems. The existing methods of description are briefly considered, such as nearest neighbor methods, separating hypersurface methods, support hypersurface methods, and probability density function methods. A technique is proposed that makes it possible to reduce the total errors of the first and second kind when describing image classes based on the probability density function. The problem of reconstructing the probability density function is also considered. Based on the experiments carried out, the advantage of the nonparametric Rosenblatt—Parzen method was revealed in comparison with the parametric approach, and a decision was made to apply this method to restore the density function based on experimental data. The recovery of probability density functions based on the Rosenblatt—Parzen method is interrelated with the search for a vector of optimal blur coefficients for each function. To solve this problem, it was proposed to use the gradientless Nelder—Mead method known as the simplex method. As a result:

1) *The description of the realization of the method of formalized description of the image class based on the reconstruction of the probability density function based on experimental data with the help of the non-parametric Nelder—Mead method was proposed*

2) *Testing of this method was performed in comparison with the classical parametric reconstruction of the probability density function and the advantage of the proposed approach was revealed.*

Keywords: *formalized description, image class, nonparametric statistics, blur coefficient, Nelder—Mead method, mathematical programming*

DOI: 10.17587/it.25.86-96

References

1. Kasatkin S. S., Kalajda V. T. *Programmная система для вычисления формализованных характеристик полутонного изображения, не зависящих от условий съемки* (A software system for calculating the formalized characteristics of a halftone image independent of the shooting conditions), *Nauchnaja sessija TUSUR*, 2014, Part 4, pp. 47—49 (in Russian).

2. Tarbaev B. B., Kalajda V. T. *Razrabotka algoritma programmnoj sistemy formalizovannogo opisaniya polutonovyh*

izobrazhenij, invariantnyh k affinnym preobrazovanijam (Development of an algorithm for a software system for the formalized description of halftone images that are invariant to affine transformations), *Materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh "Nauchnaja sessija TUSUR—2014"*, Part 4, 2014, pp. 52—45 (in Russian).

3. Abdul Kadir, Lukito Edi Nugroho, Adhi Susanto, P. Insap Santosa. Experiments of zernike moments for leaf identification, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 15 July 2012, vol. 41, no. 1, pp. 82—93.

4. Kalajda V. T., Tarbaev B. B., Kasatkin S. S. *Raspoznavanie polutonovogo izobrazhenija lica na osnove formalizacii opisaniya klassa neparametricheskimi statistikami* (Recognition of a halftone image of a person on the basis of formalization of a class description by non-parametric statisticians), *Mir Nauki i Innovacii*, 2016, part 10, no. 1 (3), pp. 44–56 (in Russian).
5. Kasatkin S. S., Kalajda V. T. *Identifikacija polutonovogo izobrazhenija lica cheloveka* (Identification of a halftone image of a person's face), *Nauchnaja sessija TUSUR—2015*, part 2, 2015, pp. 205–208 (in Russian).
6. Tarbaev B. B., Kalajda V. T. *Vychislenie formal'nyh invariantnyh priznakov, opisyvajushhih izobrazhenie* (Calculation of formal invariant characteristics describing an image), *Materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh "Nauchnaja sessija TUSUR—2015"*, part 2, 2015, pp. 244–247 (in Russian).
7. Ageeva N. M., Antonov V. N., Kalajda V. T. et al. *Nauka i innovacii v sovremennom mire: tehnika i tehnologii* (Science and Innovations in the Modern World: Technology and Technology), Odessa, Kuprienko SV, 2017, 157 p. (in Russian).
8. Kasatkin S. S., Kalajda V. T. *Analiz metodov raspoznavanija izobrazhenij* (Analysis of image recognition methods), *Nauka i innovacii v sovremennom mire: tehnika i tehnologii*, 2017, part. 3, pp. 110–116 (in Russian).
9. Kasatkin S. S. The methods of pattern recognition: A Review, *Trudy Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj shkoly*, 2017, pp. 128–131.
10. Lapko A. I., Lapko V. A. *Neparametricheskie modeli i algoritmy obrabotki informacii: ucheb. posobie* (Nonparametric models and algorithms for information processing), Krasnojarsk, Publishing house of Sib. gos. ajerokosmich. un-t, 2010, 220 p. (in Russian).
11. Kalajda V. T., Elizarov A. I. *Metod opornoj giperpoverhnosti dlja identifikacii izobrazhenija lica cheloveka* (Method of a reference hypersurface for identification of the image of a person's face), *Vychislitel'nye Tehnologii*, 2012, part. 17, no. 5, pp. 65–70 (in Russian).
12. Voloshin G. Ja. *Metody raspoznavanija obrazov* (Methods of pattern recognition), available at: http://abc.vvsu.ru/Books/Metody_r/default.asp (date of access: 07.06.2018) (in Russian).
13. *Analiz sushhestvujushhih podhodov k raspoznavaniju lic* (Analysis of existing approaches to face recognition), available at: <http://habrahabr.ru/company/synesis/blog/238129/> (date of access: 18.08.2018) (in Russian).
14. Minaev E. Ju., Nikonorov A. V. *Detektirovanie i raspoznavanie ob'ektov v sistemah avtomobil'noj bezopasnosti na osnove fraktal'nogo analiza* (Detection and recognition of objects in automotive safety systems based on fractal analysis), *Komp'juternaja Optika*, 2012, vol. 36, no. 1, pp. 124–130 (in Russian).
15. *Vydelenie i raspoznavanie lic. b.d.* (Isolation and facial recognition. b.d.), available at: http://wiki.technicalvision.ru/index.php/vydelenie_i_raspoznavanie_lic (date of access: 18.08.2018) (in Russian).
16. Duda R., Hart P. *Raspoznavanie obrazov i analiz scen* (Pattern Recognition and Scene Analysis), Moscow, MIR, 1976, 509 p. (in Russian).
17. Butenkov S. A. *Obobshhennye geometricheskie modeli i mnogourovnevnyj analiz izobrazhenij v intellektual'nyh sistemah* (Generalized geometric models and multi-level image analysis in intelligent systems), *Izvestija Juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2003, pp. 21–28 (in Russian).
18. Vizil'ter Ju. V., Zheltov S. Ju., Bondarenko A. V., Ososkov M. B., Mopzhin A. V. *Obrabotka i analiz izobrazhenij v zadachah mashinnogo zrenija* (Image processing and analysis in computer vision tasks), Moscow, Fizmatkniga, 2010, 689 p. (in Russian).
19. Fisenko V. T., Fisenko T. Ju. *Komp'juternaja obrabotka i raspoznavanie izobrazhenij* (Computer processing and image recognition), Sankt-Peterburg, Publishing house of ITMO, 2008, 195 p. (in Russian).
20. Furman Ja. A., Jur'ev A. N., Janshin V. V. *Cifrovye metody obrabotki i raspoznavanija binarnykh izobrazhenij* (Digital methods of processing and recognition of binary images), Krasnojarsk, Publishing house of Krasnojarsk. un-t, 1992, 248 p. (in Russian).
21. Lifshic Ju. *Statisticheskie metody raspoznavanija obrazov. Lekcii* (Statistical methods of pattern recognition. Lectures), available at: <http://yury.name/modern/07modernnote.pdf> (date of access: 18.08.2018) (in Russian).
22. Nemirovskij V. B., Stojanov A. K. *Raspoznavanie nechjotkih dublikatov izobrazhenij, osnovannoe na rangovom raspredelenii moshhnoej klasterov jarkosti* (Recognition of fuzzy duplicate images based on the rank power distribution of brightness clusters), *Komp'juternaja Optika*, 2014, vol. 38, no. 4, pp. 811–817 (in Russian).
23. Shapiro L., Stokman D. *Komp'juternoe zrenie* (Computer vision), Moscow, Binom. Laboratorija znaniy, 2013, 752 p. (in Russian).
24. Briljuk D., Starovojtov V. *Raspoznavanie cheloveka po izobrazheniju lica nejrosetevymi metodami* (Recognition of a person by the image of a person using neural network methods), available at: <http://www.masters.donntu.org/2008/kita/baglikov/library/4.htm> (date of access: 18.08.2018) (in Russian).
25. Forsajt D. A., Pons Zh. *Komp'juternoe zrenie. Sovremennij podhod* (Computer vision. Modern approach), Moscow, Vil'jams, 2004, 928 p. (in Russian).
26. Tu Dzh., Gonsales R. *Principy raspoznavanija obrazov* (Principles of pattern recognition), Moscow, Mir, 1978, 416 p. (in Russian).
27. Verhagen K., Dejn R., Grun F. *Raspoznavanie obrazov: sostojanie i perspektivy* (Pattern Recognition: State and Prospects), Moscow, Radio i svjaz', 1985, 117 p. (in Russian).
28. Fukunaga K. *Vvedenie v statisticheskiju teoriju raspoznavanija obrazov* (Introduction to statistical pattern recognition theory), Moscow, Nauka, 1979, 368 p. (in Russian).
29. Zagorujko N. G. *Metody raspoznavanija i ih primenenie* (Recognition methods and their application), Moscow, Kniga po Trebovaniju, 2012, 221 p. (in Russian).
30. Chanyshv O. G. *Kurs lekcij "Vvedenie v II." Chast' II. Raspoznavanie obrazov Lekcija 13. Algoritmy raspoznavanija obrazov* (Course of lectures "Introduction to AI." Part II. Pattern Recognition Lecture 13. Pattern Recognition Algorithms), available at: <http://deadbeef.narod.ru/work/docs/ai/11.pdf> (date of access: 18.08.2018) (in Russian).
31. Gonsales R., Vuds R. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij* (Digital image processing), Moscow, Tehnosfera, 2012, 1104 p. (in Russian).
32. Voroncov K. V. *Lekcii po statisticheskim (bajesovskim) algoritmam klassifikacii. Lekcii* (Lectures on statistical (Bayesian) classification algorithms. Lectures), available at: <http://www.ccas.ru/voron/download/Bayes.pdf> (date of access: 18.08.2018) (in Russian).
33. Mokeev V. V., Tomilov S. V. *O reshenii zadachi raspoznavanija izobrazhenij metodom glavnnykh komponent i linejnym diskriminantnym analizom* (On the solution of the problem of image recognition by the method of principal components and linear discriminant analysis), *Komp'juternaja Optika*, 2014, vol. 38, no. 4, pp. 871–880 (in Russian).
34. Vapnik V. N., Chervonenkis A. Ja. *Teorija raspoznavanija obrazov (statisticheskie problemy obuchenija)* (Pattern Recognition Theory (Statistical Learning Problems)), Moscow, Nauka, 1974, 416 p. (in Russian).
35. Voloshin G. Ja., Burlakov I. A., Kosenkova S. T. *Statisticheskie metody reshenija zadach raspoznavanija, osnovannye na ap-proksimacionnom podhode* (Statistical methods for solving recognition problems based on the approximation approach), Vladivostok, Publishing house of Tihookean. okeanol. in-t DVO RAN, 1992, pp. 260–270 (in Russian).

36. **Fu K.** *Strukturnye metody v raspoznavanii obrazov* (Structural methods in pattern recognition), Moscow, MIR, 1977, 320 p. (in Russian).
37. **Aprausheva N. N., Sorokin S. V.** *Zametki o gaussovykh smesjah* (Notes on Gaussian Mixtures), Moscow, VCRAN, 2015, 145 p. (in Russian).
38. **Haralik R. M.** *Statisticheskij i strukturnyj podhody k opisaniju tekstur* (Statistical and structural approaches to the description of textures), *TIIIJeR*, 1979, vol. 67, no. 5 (in Russian).
39. **Patrik Je. A.** *Osnovy teorii raspoznavanija obrazov* (Basics of pattern recognition theory), Moscow, Sovetskoe radio, 1980, 407 p. (in Russian).
40. **Bolotova Ju. A., Spicyn V. G., Rudometkina M. N.** *Raspoznavanie avtomobil'nyh nomerov na osnove metoda svjaznyh komponent i ierarhicheskoj vremennoj seti* (Recognition of license plates based on the method of connected components and a hierarchical temporary network), *Komp'juternaja Optika*, 2015, vol. 39, no. 2, pp. 275–280 (in Russian).
41. **Luk'janica A. A., Shishkin A. G.** *Cifrovaja obrabotka videoizobrazhenij* (Digital video processing), Moscow, Aj-Jes-Jes Press, 2009, 518 p. (in Russian).
42. **Savchenko A. V.** *Raspoznavanie izobrazhenij na osnove verojatnostnoj neyronnoj seti s proverkoj odnorodnosti* (Image recognition based on a probabilistic neural network with uniformity testing), *Komp'juternaja Optika*, 2013, vol. 37, no. 2, pp. 254–262 (in Russian).
43. **Kirjushina A. E.** *Raspoznavanie matematicheskikh simvolov s ispol'zovaniem svertochnoj neyronnoj seti* (Recognition of mathematical symbols using a convolutional neural network), *Naukoemkie Informacionnye Tehnologii*, 2013, p. 5 (in Russian).
44. **Mesteckij L. M.** *Matematicheskie metody raspoznavanija obrazov. Kurs lekcij* (Mathematical methods of pattern recognition. Lecture course), Publishing house of MSU, 2004, 85 p. (in Russian).
45. **Soldatova O. P., Garshin A. A.** *Primenenie svertochnoj neyronnoj seti dlja raspoznavanija rukopisnyh cifr* (Application of convolutional neural network for handwriting recognition), *Komp'juternaja Optika*, 2010, vol. 34, no. 2, pp. 252–259 (in Russian).
46. **Greshilov A. A.** *Matematicheskie metody prinjatija reshenij* (Mathematical decision making methods), Moscow, Publishing house of MGTU, 2014, 647 p. (in Russian).
47. **Kuznecov A. V., Mjasnikov V. V.** *Sravnenie algoritmov upravljaemoj pojelementnoj klassifikacii giperspektral'nyh izobrazhenij* (Comparison of algorithms for controlled elementwise classification of hyperspectral images), *Komp'juternaja Optika*, 2014, vol. 38, no. 3, pp. 494–502 (in Russian).
48. **Savchenko A. V.** *Vybor parametrov algoritma raspoznavanija izobrazhenij na osnove kollektiva reshajushhih pravil i principa maksimuma aposteriornoj verojatnosti* (The choice of parameters of the image recognition algorithm based on a team of decision rules and the principle of maximum a posteriori probability), *Komp'juternaja Optika*, 2012, vol. 36, no. 1, pp. 116–123 (in Russian).
49. **Gorelik A., Skripkin V.** *Metody raspoznavanija* (Recognition methods), Moscow, Vysshaja shkola, 1984, 208 p. (in Russian).
50. **Lapko A. I., Lapko V. A.** *Regressionnaja ocenka plotnosti verojatnosti i ee primenenie* (Regression estimation of probability density and its application), *XII vserossijskoe soveshhanie po problemam upravlenija VSPU*, 2014, pp. 1101–1107 (in Russian).
51. **Sojfer V. A.** *Metody komp'juternoj obrabotki izobrazhenij* (Computer image processing methods), Moscow, Fizmatlit, 2003, 784 p. (in Russian).
52. **Himel'blaju D.** *Prikladnoe nelinejnoe programmirovanie* (Applied nonlinear programming), Moscow, Mir, 1975, 536 p. (in Russian).

V МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ (ИТНТ—2019)»

С 21 по 24 мая 2019 года в Самаре на базе Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева и Института систем обработки изображений РАН — филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» Российской Академии Наук состоится V Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2019).

Целью проведения **Конференции ИТНТ—2019** является предоставление возможности научных дискуссий и обсуждения результатов фундаментальных и прикладных исследований в области информационных технологий и нанотехнологий, привлечение молодежи в сферу передовых научных исследований, обмен опытом научно-образовательной деятельности при подготовке ИТНТ-специалистов.

Основные направления конференции

- **Секция 1** «Компьютерная оптика и нанофотоника» (дифракционная оптика и нанофотоника, оптика наноструктур, оптические информационные технологии)
- **Секция 2** «Обработка изображений и дистанционное зондирование Земли» (обработка и анализ сигналов и изображений, компьютерное зрение, распознавание зрительных образов, геоинформационные технологии, обработка и анализ данных дистанционного зондирования Земли)
- **Секция 3** «Математическое моделирование физико-технических процессов и систем»
- **Секция 4** «Науки о данных» (интеллектуальный анализ данных, «большие данные», машинное обучение, криптография, криптоанализ, суперкомпьютерные технологии).

Организаторы

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Контакты

Ответственный секретарь: Козлова Елена Сергеевна, тел.: +7 (846) 332-57-87.

Веб-сайт конференции: itnt-conf.org.

Ответственный секретарь: secretary@itnt-conf.org.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В БИМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ

INFORMATION SYSTEMS IN BIOMEDICAL SYSTEMS

УДК 004.89

DOI: 10.17587/it.25.97-106

В. В. Грибова, д-р техн. наук, зам. директора по научной работе, зав. лаб., gribova@iacp.dvo.ru,

Ф. М. Москаленко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., philipmm@iacp.dvo.ru,

Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток,

К. И. Шахгельдян, д-р техн. наук,

директор института информационных технологий, carinash@vvsu.ru,

Д. В. Гмарь,

руководитель Центра информационно-технического обеспечения, dmitriy.gmar@vvsu.ru,

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, г. Владивосток,

Б. И. Гельцер, д-р мед. наук,

директор департамента клинической медицины Школы биомедицины, boris.geltser@vvsu.ru,

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Концепция гетерогенного хранилища биомедицинской информации¹

Предложена концепция хранилища биомедицинских данных и знаний. Архитектурной особенностью хранилища является интеграция первичных клинических и статистических данных, результатов их обработки и анализа, объединение последних с известными медицинскими знаниями по диагностике и лечению заболеваний и использование их для развития персонализированных трендов в клинической медицине. Хранилище имеет распределенную архитектуру и объединяет информационные и программные компоненты.

Ключевые слова: гетерогенное хранилище, биомедицинская информация, интеллектуальные информационные системы, методы анализа данных, онтологии, базы знаний

Введение

В последние годы существенно увеличиваются объемы информации в различных сегментах системы здравоохранения и клинической медицины в связи с накоплением данных из электронных историй болезни, результатов лабораторных и инструментальных исследований, мобильных устройств для мониторинга физиологических функций человека, экономических показателей деятельности медицинских организаций и др. [1]. Естественным следствием этих процессов является возможность дальнейшего использования этой информации в клинических и популяционных исследованиях, при построении интеллектуальных систем поддержки принятия решений

для организаторов здравоохранения и клиницистов. Необходимость таких исследований обусловлена развитием персонифицированной медицины, где роль интеллектуальных средств поддержки лечебно-диагностической деятельности многократно возрастает. Вместе с тем существует ряд проблем, затрудняющих повторное использование биомедицинских данных в целях извлечения из них новых знаний и построения интеллектуальных систем для профилактики, диагностики и лечения заболеваний. Первая из них связана с хранением первичных данных в разрозненных источниках: медицинских и лабораторных информационных системах (МИС и ЛИС), медицинской статистической отчетности, отчетах Росстата, Роспотребнадзора и др. При этом отсутствуют единые стандарты хранения информации, а первичные данные обычно представлены в таблицах Excel, в файлах формата doc или pdf в свободной, часто меняющейся

¹ Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-29-03131, 17-07-00956.

форме. Вторая проблема связана с тем, что вторичные данные, представленные в виде результатов обработки, также не имеют стандартов или общепринятых форм хранения. Третья проблема заключается в том, что биомедицинские данные, как правило, слабо формализованы и плохо структурированы. Кроме того, полученные в результате анализа и обработки первичных данных новые медицинские знания не используются интеллектуальными информационными системами, обеспечивающими поддержку принятия врачебных решений. Решение указанных проблем возможно только на основе создания новой технологии, включающей модели, методы и программные средства, обеспечивающие хранение и обработку гетерогенных первичных и вторичных биомедицинских данных. Использование такой технологии позволит, с одной стороны, проводить научные исследования и получать новые знания в области организации здравоохранения, профилактической и клинической медицины, а с другой — разрабатывать интеллектуальные информационные системы, повышающие эффективность диагностики, лечения и прогнозирования исходов заболеваний.

Целью исследования является разработка концепции гетерогенного хранилища (ГХ) биомедицинской информации.

1. Обзор существующих решений

Создание хранилищ данных широко практикуется уже много лет в различных областях знаний. Системы для хранения электронных медицинских записей стали активно развиваться только с начала 1990-х годов [2]. Для электронных историй болезни были предложены стандарты, например, такие как HL7, ГОСТ 52636—2006 [3, 4]. Вместе с тем создание хранилищ для здравоохранения долгие годы представляло серьезную проблему ввиду сложности и гетерогенности медицинских, в том числе клинических, данных [5]. Кроме того, возникла необходимость создания информационных систем, которые бы не ограничивались только ведением историй болезни и амбулаторных карт, но и обеспечивали поддержку принятия профессиональных врачебных решений, необходимых для эффективного лечения больных [2]. На необходимости интеграции, очистки и форматирования биомедицинских данных фиксировали внимание самые первые

публикации по созданию гетерогенных хранилищ [6, 7]. Для интеграции клинических данных были разработаны несколько стандартов, относящихся не только к историям болезни, но и к медицинской терминологии (англоязычной): RxNorm, SNOMED-CT, ICD, LOINC, UMLS, DRG code [8, 9]. Понимание преимуществ совместного владения данными из различных организаций стало мотивом для создания федеральных информационных систем по отдельным заболеваниям [10, 11]. Некоторые базы клинических данных преобразовались в деперсонализированные хранилища, доступные для исследовательских и образовательных целей [12].

Начиная с конца 90-х годов появляются научные работы по применению методов Data mining в целях повышения эффективности управления здравоохранением и отдельными медицинскими организациями. Основными направлениями здесь являлись: оптимизация ресурсов, страховая медицина, оптимальные объемы коечного фонда, маршрутизация пациентов к специалистам различных профилей и др. [13, 14]. Наряду с решением экономических и управленческих задач тогда же появились исследования, в которых использовались факторный анализ, деревья принятия решений, векторные машины, байесовские сети, анализ Кокса и др., которые способствовали получению новых знаний, повышающих качество клинических решений [15—17]. В конце 90-х стало понятно, что хранилища позволяют не только повысить эффективность и снизить расходы на здравоохранение, но и улучшить качество медицинской помощи за счет извлечения знаний из данных и повторного использования баз знаний [18].

С начала 2000-х годов в тренде доказательной медицины активно развиваются системы поддержки принятия врачебных решений. Уже тогда отмечалась важность интеграции в них историй болезни и известных ранее знаний с новыми научными результатами, которые могли бы расширить такой репозиторий знаний [19]. В последнее время увеличилось число работ по оценке эффективности применения этих систем в клинической практике [20].

Анализ научной литературы показал, что существующие системы хранения клинических данных не обеспечивают решение вышеописанных проблем ГХ биомедицинской информации, что подчеркивает необходимость реализации новых подходов для их решения.

2. Компоненты гетерогенного хранилища

Общая классификация

ГХ состоит из **информационных и программных компонентов** (рис. 1). **Информационными компонентами** ГХ являются:

- **онтологии** — системы формализации с помощью концептуальных схем, в соответствии с которыми формируются другие типы информационных и программных компонентов;
- **данные** — совместно используемый набор формализованных или неформализованных (включая слабоформализованные) данных разных типов. Формализованные данные — логически связанные входные или выходные данные, организованные в соответствии с поддерживаемой моделью. Неформализованными (или слабоформализованными) данными являются текстовые документы, графики, диаграммы, графические изображения и др., которые являются либо результатами работы программных систем и сервисов, требующими обработки, либо файлами с документацией;
- **знания** — формально представленные зависимости, причинно-следственные связи между данными, предназначенные для решения задач в практической медицине и образовании.

Программными компонентами являются: исходные коды программ, программные агенты, инструментальные оболочки, прикладные программные системы и сервисы. Они делятся на:

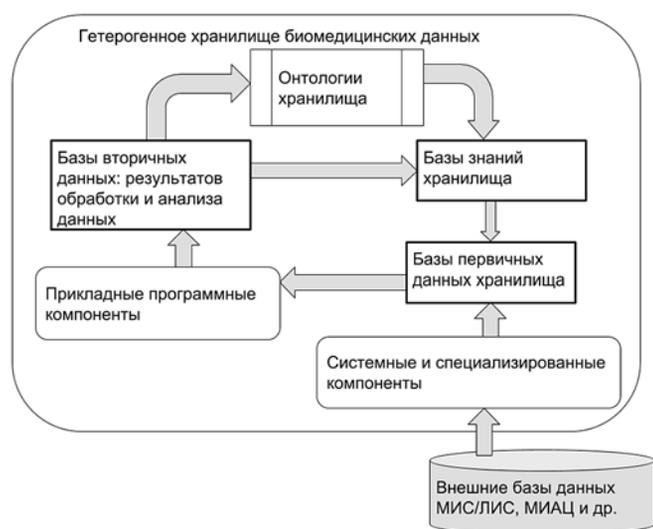


Рис. 1. Концептуальная схема ГХ

- **системные программные компоненты**, которые предназначены для организации эффективного функционирования ГХ, а их примерами являются сервис авторизации и управления правами пользователей, генератор агентов, генератор редакторов информационных ресурсов, сервис импорта и экспорта данных в ГХ и др.;
- **специализированные программные компоненты**, которые предлагают пользователю ряд сервисных функций, необходимых, прежде всего, для подготовки данных к обработке. Примерами таких компонентов являются сервисы преобразования информации из одного формата в другой, сервис формализации текста из неформализованного вида и др. К специализированным программным компонентам также относятся программные оболочки, предназначенные для создания на их основе программных систем и сервисов, ориентированных на заданный в оболочке класс задач, например, специализированная оболочка для создания интеллектуальных систем по диагностике заболеваний;
- **прикладные программные компоненты**, которые предназначены для решения научно-исследовательских и практически-значимых задач в медицине, включая обучающие системы. К прикладным программным компонентам относятся информационно-аналитические системы, системы мониторинга и прогноза, поддержки принятия врачебных решений, система поддержки проведения научных исследований, компьютерные тренажеры для отработки моторных навыков и знаний студентов.

Онтологии

Для описания используемых в хранилище структурированных информационных компонентов (данных и знаний), программных компонентов (сервисов, агентов, шаблонов сообщений), а также структуры хранилища и связей между его логическими элементами используются *онтологии*. В настоящее время использование онтологического подхода положено в основу создания многих современных компьютерных систем и тематических порталов знаний для упрощения навигации, формирования и сопровождения сложно-структурированной информации различных уровней абстракции в привычной для ее носителей си-

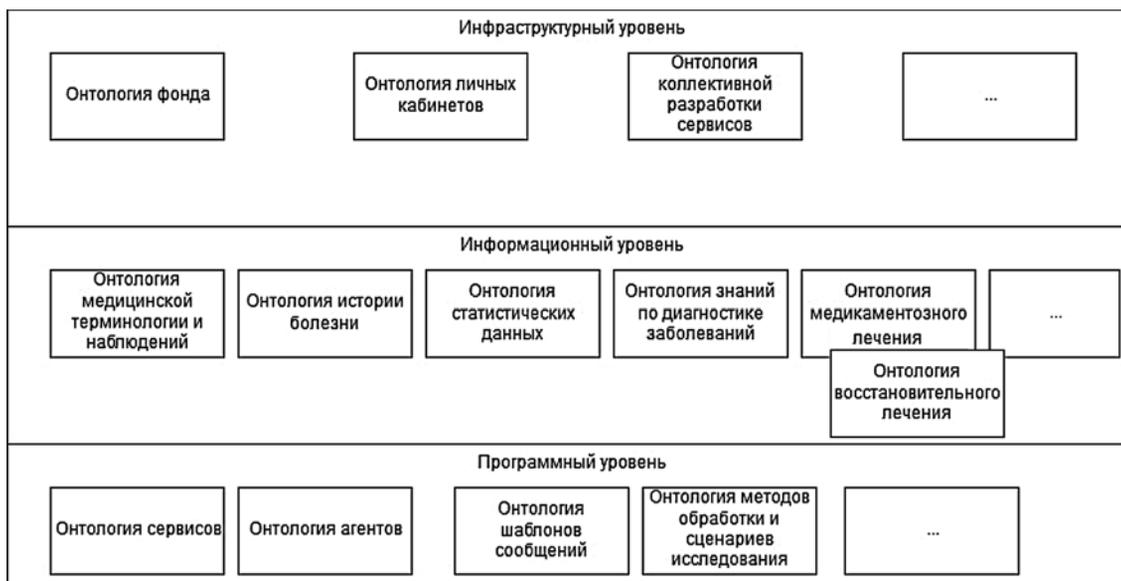


Рис. 2. Онтологии хранилища биомедицинских данных

стеме понятий — без специального обучения последних или участия в этом процессе специалистов-посредников.

Онтологии ГХ условно можно разделить на три логических уровня (рис. 2). Первый из них является *инфраструктурным*. Данный уровень включает онтологии, разработанные для организации и поддержки инфраструктуры ГХ. К ним можно отнести онтологию фонда программных и информационных ресурсов, личных кабинетов пользователей, коллективной разработки и др. [21].

Второй логический уровень — *информационный*, содержит онтологии, поддерживающие формирование информационных компонентов ГХ — баз данных и баз знаний, предназначенных для решения научных и практических задач в медицине, а также обучения студентов и повышения квалификации врачей. Среди таких онтологий, прежде всего, необходимо выделить: онтологию медицинской терминологии и наблюдений, которая задает унифицированную структуру описания всех медицинских терминов и наблюдений, онтологии истории болезни, статистических данных, лекарственных препаратов, научных исследований и другие онтологии данных, которые к настоящему времени уже созданы и находятся в ГХ, а также те, которые будут создаваться пользователями ГХ при постановке новых научно-практических задач. К данному уровню также относятся онтологии знаний, которые, прежде всего, необходимы для создания интеллектуальных систем поддержки принятия

врачебных решений: онтология диагностики острых и хронических заболеваний [22, 23], онтология назначения лечения — медикаментозного и восстановительного [24, 25]. Здесь же располагаются онтологии, описывающие экспериментальные медицинские знания, полученные в результате проведения научных исследований на основе данных ГХ.

Третий логический уровень — *программный*. Данный уровень содержит множество онтологий, описывающих структуры программных сервисов и их компонентов: онтологии сервисов, агентов, шаблонов сообщений, онтология методов обработки, сценариев научных исследований и др.

Данные

Данные ГХ делятся на *первичные*, полученные из различных внешних источников или сгенерированные средствами программных компонентов ГХ в целях их дальнейшей обработки, и *вторичные*, являющиеся результатом обработки, например, проведенного научного исследования в соответствии с некоторым сценарием, также представляющим собой вторичные данные.

Первичные данные могут быть строго-, слабо- и не формализованными. Все данные, введенные из внешних источников, требуют предварительной обработки для формализации, верификации и преобразования в соответствии со структурой терминов. ГХ поддерживает следующие типы данных:

1) истории болезни, внесенные в ГХ через интерфейс программных компонентов, извлеченные из МИС, либо представленные в формате текстовых файлов, подготовленных врачами в медицинских организациях, где отсутствуют МИС;

2) формализованные данные медицинской организации, характеризующие ее процессы и эффективность работы;

3) данные медицинской статистики, описывающие региональные и федеральные системы здравоохранения;

4) данные экологического, социально-экономического и других видов мониторинга.

Реализация алгоритмов диагностики заболеваний и поиска аналогичных случаев, определение и оценка корректности процедур лечения, проведение исследований методами машинного обучения в целях извлечения новых медицинских знаний возможны только на основе строго формализованных данных. Такие данные вводятся в ГХ через предоставляемый им программный и пользовательский интерфейс. Для повышения качества исследований и принятия решений необходимо проводить процедуры верификации строго формализованных данных, которые обеспечивают взаимосвязь историй болезни одного и того же пациента в течение жизни вплоть до смерти.

Различные МИС содержат в большинстве случаев слабоформализованные данные, хотя уровень формализации существенно варьируется: от 10 до 90 % объема информации истории болезни. Интерес для исследователей представляют и неформализованные истории болезни, например, формата doc, которых еще достаточно много в медицинских организациях России. Эти два типа данных должны быть подвергнуты специализированным процедурам формализации. Результаты лабораторных и инструментальных исследований фактически являются частью историй болезни и представляют собой строго формализованные лабораторные данные, изображения или различные виды сигналов. Информация о процессах медицинской организации обычно может быть получена из МИС и может использоваться для оценки эффективности управления и деятельности таких организаций.

Данные медицинской статистики описывают региональную или федеральную системы здравоохранения и извлекаются из систем медицинской статистики в медицинских информационно-аналитических центрах региона.

Несмотря на то что данные представлены в табличной форме, они требуют процедур предварительной обработки. Сложность вызывает тот факт, что формы статистической отчетности меняются ежегодно как по объектам учета, так и по их атрибутике и типам. Кроме того, возникают проблемы, связанные с институциональными изменениями системы регионального здравоохранения, которые необходимо учитывать при анализе временных рядов.

Данные экологического мониторинга (вода/воздух/почва) могут быть получены из систем Центров гигиены и эпидемиологии, но они также требуют предварительной обработки. Данные социально-экономического мониторинга могут быть получены из открытых источников в виде таблиц, они характеризуют социально-экономический статус различных регионов и муниципальных образований. Для извлечения этих данных требуются специализированные программные компоненты предварительной обработки.

К первичным данным относится и *справочник медицинской терминологии и наблюдений*. Этот базовый ресурс ГХ содержит формальное описание медицинских терминов, относящихся к определенным группам: морфология, физиология, патология, фармакология и др.; наблюдения, содержащие группы признаков (жалобы, данные объективного исследования, данные лабораторных и инструментальных исследований), события (лечебные, диагностические мероприятия, осложнения и др.), факторы (профессиональные вредности, вредные привычки и др.), справочник заболеваний МКБ (международной классификации болезней). В настоящее время справочник медицинской терминологии и наблюдений включает около 24 000 различных понятий и активно развивается всеми пользователями ГХ.

Вторичные данные представляют собой, во-первых, результаты обработки первичных данных методами статистического анализа, машинного обучения и искусственного интеллекта. Во-вторых, к вторичным данным относятся описания проведенных научных исследований, включая дизайн проекта, условия выборки первичных данных, последовательность применения методов и др. Научные исследования проводятся в соответствии с некоторым сценарием, в который включаются условия выборки первичных данных, методы обработки и входные параметры, результаты обработки, их интерпретация, скрипты обра-

ботки (например, на языках R, Python и др.). Важной целью сохранения в ГХ информации об исследовании является воспроизводимость (повторяемость) научных результатов, сравнение их между собой при изменении условий выборки, расширении объема первичных данных, условий применения методов обработки и др. К вторичным данным относят также все случаи применения интеллектуальных сервисов профилактики, диагностики и лечения заболеваний с протоколированием предложенной врачебной помощи и результатами применения. Эти данные необходимы для постоянного совершенствования полученных знаний, разрабатываемых алгоритмов и интеллектуальных систем.

Базы знаний

К настоящему времени в медицине накоплены уникальные знания по диагностике, лечению и профилактике заболеваний, которые представлены в медицинской литературе, научных отчетах и многочисленных статьях. Однако такие знания в неформализованном виде используются только специалистами в своей узкой области. Для повышения эффективности врачебных решений необходимо расширение применения знаний, а для этого они должны быть доступны для обработки программными системами, которые помогут врачам принять обоснованные клинические решения. С этой целью знания формализуют и формируют базы знаний, структура которых представлена в онтологиях. Основными базами знания ГХ являются: базы знаний по диагностике острых, хронических заболеваний и синдромов, базы знаний по медикаментозному и восстановительному лечению, база знаний по фармакотерапии, базы экспериментальных знаний, полученных в результате научных исследований с данными ГХ и др.

Базы знаний по диагностике острых, хронических заболеваний и синдромов. Эти базы знаний включают: комплекс диагностических признаков и вариативность их динамики; специфичность симптомов заболеваний; средства уточнения диагнозов с учетом этиологии, патогенеза, варианта течения; определение необходимых условий для развития заболеваний и др. Базы знаний групп заболеваний, доступные в ГХ в настоящее время, представлены на рис. 3 (см. вторую сторону обложки), а на рис. 4 (см. вторую сторону обложки) представ-

лен фрагмент базы знаний по диагностике геморрагической лихорадки с почечным синдромом (ГЛПС).

База знаний по назначению лечения (медикаментозного и восстановительного). В ГХ содержатся базы знаний по назначению медикаментозного и восстановительного лечения, включающие описание группы заболеваний с общими принципами лечения, как правило, симптоматического и/или патогенетического, в том числе модель, вид, цель и схему терапии. Каждый раздел базы знаний описывается набором условий, представляющих собой клиническое наблюдение, относящееся или к персональным данным пациента, или к клинической картине заболевания, результатам лабораторных и инструментальных исследований. Базы знаний по восстановительному лечению описывают возможные варианты использования методов восстановительного лечения заболеваний, учитывающие назначенную медикаментозную терапию, персональные особенности пациента, индивидуальность клинической картины заболевания.

База знаний фармакотерапии. База фармакотерапии включает описание действующих веществ с их фармакологическими группами, свойствами, заболеваниями. Ее особенностью и принципиальным отличием от аналогов является формальное описание таких значимых для систем поддержки принятия решений атрибутов, как противопоказания, побочные действия, передозировка, взаимодействие с другими лекарственными средствами. Данные атрибуты описываются как множество значений признаков, событий и факторов, связанных логическими условиями, каждый из которых имеет структуру, определенную в базе терминологии и наблюдений.

База экспериментальных медицинских знаний. База представляет собой новые медицинские знания, полученные в результате обработки и анализа первичных клинических и статистических данных ГХ методами искусственного интеллекта. Знания имеют различные формы, например, линейной, логистической, мультиномиальной, порядковой регрессий, искусственной нейронной сети и др. Эти модели вместе со своими весовыми коэффициентами, предикторами, свободными членами и архитектурой описывают физиологические процессы, определяют прогноз течения и степень тяжести заболеваний, вероятность осложнений, длительность жизни после опе-

рации и др. [26, 27]. Полученные знания должны заново верифицироваться при расширении базы первичных данных. Они используются наравне с ранее введенными в ГХ знаниями из внешних источников: стандартами лечения, правилами диагностики заболевания, назначения лечения и др. Компоненты, которые реализуют интеллектуальные сервисы по профилактике, диагностике и лечению, обеспечивая поддержку врачебных решений, используют эти знания и фиксируют все случаи их применения. Эта информация в дальнейшем учитывается для уточнения медицинских знаний.

Программные компоненты

Программные компоненты ГХ — это, прежде всего, **прикладные программные сервисы интеллектуальной обработки данных и знаний** для решения научных задач, а также задач практической медицины и образования. Для их создания используются фреймворки и программные средства общего назначения, например, платформа IASaaS [28], предназначенная для создания интеллектуальных сервисов в произвольных предметных областях, платформы с библиотеками, поддерживающие обработку больших массивов данных, например, R-studio (с языком R), Anaconda (с языком Python), а также специализированные оболочки и системы, ориентированные на создание интеллектуальных систем и сервисов, решающих задачи определенных классов, например, диагностики процессов (заболеваний).

Системная программная компонента импорта и экспорта данных в/из ГХ. Импорт клинических данных выполняется в соответствии с онтологиями истории болезни с использованием базы данных медицинской терминологии и наблюдений. Импортировать можно только строго формализованные данные.

Специализированная программная компонента предварительной обработки клинических данных. Предварительная обработка клинических данных включает: структурирование историй болезни и формализацию ее разделов. Структурирование историй болезни выполняется в соответствии с онтологией истории болезни, когда из неструктурированных файлов, обычно формата doc, выделяются разделы (жалобы, дневники, выписка, эпикриз и др.) и фиксируется текст внутри каждого раздела. Формализация истории болезни подразумевает превращение текста внутри разделов

в числовые, строковые и категориальные переменные. По определенным правилам, соответствующим разделам историй болезни, формируются грамматики, которые с помощью средств обработки текста, например Томита-парсер, обеспечивают формализацию текста. В качестве словарей используются база данных медицинских терминов и наблюдений и база знаний диагностики и лечения.

Специализированная программная компонента предварительной обработки статистических данных. Компонента обеспечивает решение проблем данных, связанных с ежегодным изменением форм статистической отчетности, изменением объектов учета, их атрибутов, и позволяет формировать временные ряды, которые пригодны для соответствующего анализа [29]. Также эта компонента позволяет приводить к табличному виду статистические данные, собранные из открытых источников (РОССТАТ, НИИ Информатизации здравоохранения и др.).

Специализированная оболочка для создания систем поддержки принятия решений для практической медицины [30, 31]. Она позволяет создавать системы поддержки принятия клинических решений по диагностике и лечению заболеваний в различных разделах медицины. Она использует, помимо информационных компонентов ГХ, решатели задач по диагностике и назначению лечения. Расширение областей применения оболочки связано с формированием новых разделов медицины в базах данных и знаний ГХ. Оболочка предоставляется пользователям как облачный сервис.

Заключение

Быстрый рост объемов биомедицинской информации позволяет надеяться на развитие тренда персонализированной медицины. Одним из серьезных препятствий к исследованиям в этом направлении является отсутствие технологии хранения, обработки, анализа и верификации такой информации. В работе предложена концепция хранилища биомедицинских данных и знаний, объединяющего данные из разных источников, разной природы. Архитектурной особенностью хранилища является интеграция первичных клинических и статистических данных, результатов их обработки и анализа, объединение последних с известными медицинскими знаниями по ди-

агностике и лечению заболеваний и использование их для развития персонализированных трендов в клинической медицине. ГХ имеет компонентную распределенную архитектуру и объединяет информационные и программные компоненты. К первым относятся: данные, онтологии и базы знаний, вторые делятся на: системные, специализированные и прикладные.

К настоящему времени разработаны и используются многие программные и информационные компоненты ГХ, продолжают работы по созданию новых компонентов ГХ и усовершенствованию имеющихся.

Список литературы

1. **Andreu-Perez J., Poon C. C. Y., Merrifield R. D., Wong S. T., Yang G. Z.** Big Data for Health // *IEEE Journal of biomedical and health informatics*. 2015. Vol. 19, N. 4. P. 1193–1208.
2. **Evans R. S., Lloyd J. F., Pierce L. A.** Clinical Use of an Enterprise Data Warehouse // *AMIA Annu Symp. Proc.* 2012. P. 189–198.
3. **HL7 Standards** URL: <http://www.hl7.org/implementation/standards/index.cfm?ref=nav> (дата обращения: 10.11.2018).
4. **Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 52636—2006** "Электронная история болезни. Общие положения". URL: <http://dikipedia.ru/document/5324420> (дата обращения: 12.11.2018).
5. **Chute C. G., Beck S. A., Fisk T. B., Mohr D. N.** The Enterprise Data Trust at Mayo Clinic: a semantically integrated warehouse of biomedical data // *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2010. Vol. 17, N. 2. P. 131–135.
6. **Verma R., Harper J.** Life cycle of a data warehousing project in healthcare // *Journal of healthcare information management*. 2001. Vol. 15, N. 2. P. 107–117.
7. **Kerkri E. M., Quantin C., Allaert F. A., Cottin Y., Charve P., Jouanot F., Yetongnon K.** An approach for integrating heterogeneous information sources in a medical data warehouse // *Journal of Medical Systems*. 2001. Vol. 25, N. 3. P. 167–176.
8. **Kamal J., Liu J., Ostrander M., Santangelo J., Dyta R., Rogers P., Mekhjian H. S.** Information warehouse — a comprehensive informatics platform for business, clinical, and research applications // *AMIA Annual Symposium Proceedings*. 2010. N. 13. P. 452–456.
9. **Grant A., Moshyk A., Diab H., Carona P., Fabien de Lorenzi, Bissona G., Menarda L., Lefebvre R., Gauthier P., Grondin R., Desautels M.** Integrating feedback from a clinical data warehouse into practice organisation // *International Journal of Medical Informatics*. 2006. Vol. 75, N. 3–4. P. 232–239.
10. **Cao X., Wong S. T., Kent S., Tjandra D. C., Lowenstein D. H.** A web-based federated neuroinformatics model for surgical planning and clinical research applications in epilepsy // *Neuroinformatics*. 2004. Vol. 2, N. 1. P. 101–117.
11. **Livne O. E., Schultz N. D., Narus S. P.** Federated Querying Architecture with Clinical & Translational Health IT Application // *Journal of medical systems*. 2011. Vol. 35, N. 5. P. 1211–1224.
12. **Erdal B. S., Liu J., Ding J., Chen J., Marsh C. B., Kamal J., Clymer B. D.** A Database De-identification Framework to Enable Direct Queries on Medical Data for Secondary Use // *Methods of information in medicine*. 2012. Vol. 51, N. 3. P. 229–241.
13. **Silver M., Sakata T., Su H. C., Herman C., Dolins S. B., O'Shea M. J.** Case study: how to apply data mining techniques in a healthcare data warehouse // *Journal of healthcare information management*. 2001. Vol. 15, N. 2. P. 155–164.
14. **Chen Y., Matsumura Y., Nakagawa K., Ji S., Nakano H., Teratani T., Zhang Q., Mineno T., Takeda H.** Analysis of yearly variations in drug expenditure for one patient using data warehouse in a hospital // *Journal of medical systems*. 2007. Vol. 31, N. 1. P. 17–24.
15. **Zhou X., Chen S., Liu B., Zhang R., Wang Y., Li P., Guo Y., Zhang H., Gao Z., Yan X.** Development of traditional Chinese medicine clinical data warehouse for medical knowledge discovery and decision support // *Artificial Intelligence in Medicine*. 2010. V. 48, N. 2–3. P. 139–152.
16. **Cho I. S., Haug P. J.** The contribution of nursing data to the development of a predictive model for the detection of acute pancreatitis // *Stud Health Technol Inform*. 2006. N. 122. P. 139–142.
17. **Botsis T., Anagnostou V. K., Hartvigsen G., Hripcsak G., Weng C.** Developing a multivariable prognostic model for pancreatic endocrine tumors using the clinical data warehouse resources of a single institution // *Applied Clinical Informatics*. 2010. Vol. 1, N. 1. P. 38–49.
18. **Hollis J.** Deploying an HMO's data warehouse // *Health management technology*. 1998. V. 19, N. 8. P. 46–48.
19. **Sim I., Gorman P., Greenes R. A., Haynes R. B., Kaplan B., Lehmann H., Tang P. C.** Clinical decision support systems for the practice of evidence-based medicine // *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2001. Vol. 8, N. 6. P. 527–534.
20. **Moja L., Friz H. P., Capobussi M., Kwag K., Banzi R., Ruggiero F., González-Lorenzo M., Liberati E. G., Mangia M., Nyberg P., Kunnamo I., Cimminiello C., Vighi G., Grimshaw J., Bonovas S.** Implementing an evidence-based computerized decision support system to improve patient care in a general hospital: the CODES study protocol for a randomized controlled trial // *Implementation Science*. 2016. N. 11:89. P. 1–10.
21. **Грибова В. В., Клещев А. С., Москаленко Ф. М., Тимченко В. А., Федорищев Л. А., Шалфеева Е. А.** Управляемая графовыми грамматиками разработка оболочек интеллектуальных сервисов на облачной платформе IACPaas // *Программная инженерия*. 2017. Т. 8, № 10. С. 435–447.
22. **Gribova V., Okun D., Petryaeva M., Shalfeeva E., Tarasov A.** Ontology for Differential Diagnosis of Acute and Chronic Diseases // *Communications in Computer and Information Science*. 2018. Vol. 934. P. 152–163.
23. **Грибова В. В., Петряева М. В., Окунь Д. Б., Шалфеева Е. А.** Онтология медицинской диагностики для интеллектуальных систем поддержки принятия решений // *Онтология проектирования*. 2018. Т. 8, № 1 (27). С. 58–73.
24. **Грибова В. В., Окунь Д. Б.** Онтологии для формирования баз знаний и реализации лечебных мероприятий в медицинских интеллектуальных системах // *Информатика и системы управления*. 2018. № 3 (57). С. 71–80.
25. **Грибова В. В., Окунь Д. Б.** Онтология база знаний восстановительного лечения // *Системный анализ в медицине (САМ 2018): Материалы XII международной научной конференции под общ. ред. В. П. Колосова. (Благовещенск, 2018 г.)*. 2018. С. 47–50.
26. **Гельцер Б. И., Скляр Л. Ф., Елисева В. С., Шахгельдян К. И., Маркелова Е. В., Емцева Е. Д., Бениоваи С. Н.** Оценка иммунологических показателей при лекарственной устойчивости ВИЧ на фоне ВААРТ // *ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии*. 2018. Т. 10, № 1. С. 54–62.
27. **Гельцер Б. И., Шахгельдян Б. И., Курпатов И. А., Котельников В. Н.** Результаты моделирования должных величин силы дыхательных мышц на основе методов искусственного интеллекта // *Российский физиологи-*

ческий журнал им. И. М. Сеченова. 2018. Т. 104, № 9. С. 1065–1074.

28. Грибова В. В., Клещев А. С., Москаленко Ф. М., Тимченко В. А., Федорищев Л. А., Шалфеева Е. А. Облачная платформа IASaaS для разработки оболочек интеллектуальных сервисов: состояние и перспективы развития // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31, № 3. С. 527–536.

29. Шахгельдян К. И., Гельцер Б. И., Гмарь Д. В., Кривелевич Е. Б., Теук К. А., Транковская Л. В. Проблемы анализа данных медицинской статистики // Проблемы социальной

гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2018. Т. 26, № 3. С. 132–136.

30. Gribova V. V., Petryaeva M. V., Okun D. B., Tarasov A. V. Software Toolkit for Creating Intelligent Systems in Practical and Educational Medicine // 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). (Vladivostok, 18–25 Aug. 2018). IEEE Xplore, 2018. P. 1–5.

31. Грибова В. В., Москаленко Ф. М., Окунь Д. Б., Петряева М. В. Облачная среда для поддержки клинической медицины и образования // Врач и информационные технологии. 2016. № 1. С. 60–66.

V. V. Gribova, D. Sc. (Technical Sciences), Deputy Director,
Head of intelligent systems lab, gribova@iacp.dvo.ru,

Ph. M. Moskalenko, Ph. D. (Technical Sciences),
Senior Researcher in intelligent systems lab, philipmm@iacp.dvo.ru,
Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok,

C. I. Shahgeldyan, D. Sc. (Technical Sciences),

Head of information technologies institute, carinash@vvsu.ru,

D. V. Gmar', Head of information technology center, dmitriy.gmar@vvsu.ru,
Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok,

B. I. Geltser, D. Sc. (Medical Sciences),

Head of clinical medicine department of Biomedicine school, boris.geltser@vvsu.ru,
Far-Eastern State University, Vladivostok

A Concept for a Heterogeneous Biomedical Information Warehouse

One of the major obstacles of expanding research in the field of personified medicine is the lack of technology for storing, processing, analyzing and verifying of biomedical information. The paper proposed the concept of biomedical data and knowledge warehouse, which combines information from different sources of various nature. The architectural feature is the integration of primary clinical and statistical data, results of their processing and analysis, combination of the latter with known medical knowledge on diagnostics and disease treatment and their use in clinical medicine. Heterogeneous warehouse has a component distributed architecture and combines information (ontologies, data and knowledge bases) and software (system, specialized and applied) units. Ontologies are divided into three layers: infrastructure (meant for infrastructure support of the warehouse), information (support formation of data and knowledge components) and software (these ontologies set structures for software components). Data is divided into primary (received from outer sources — case records, formalized data of the medical organizations, medical statistics, monitoring logs) and secondary (acquired while data analysis by statistical methods, machine learning and artificial intelligence). Knowledge bases describe diagnostics, cures and pharmacotherapy, treatment assignment. Several information resources and software components are described (medical terminology and observations glossary, export/import tool, clinical data preprocessing tool, statistics data preprocessing tool, specialized shell for decision support system development). To date, many software and information components of the warehouse have been developed and are being used, work continues on the creation of new components and the improvement of existing ones.

Keywords: heterogeneous repository of biomedical information, intelligent information systems, data analysis methods, ontologies, knowledge bases

DOI: 10.17587/it.25.97-106

References

1. Andreu-Perez J., Poon C. C. Y., Merrifield R. D., Wong S. T., Yang G. Z. Big Data for Health, *IEEE Journal of biomedical and health informatics*, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 1193–1208.

2. Evans R. S., Lloyd J. F., Pierce L. A. Clinical Use of an Enterprise Data Warehouse, *AMIA Annu Symp Proc.*, 2012, pp. 189–198.

3. HL7 Standards, available at: <http://dokipedia.ru/document/5324420> (date of access: 10.11.2018) (in Russian).

4. Nacional'nyj standart RF GOST R 52636–2006 "Jelektronnaja istorija bolezni. Obshhie polozenija" (Digital case record. General information), available at: <http://dokipedia.ru/document/5324420> (date of access: 12.11.2018) (in Russian).

5. Chute C. G., Beck S. A., Fisk T. B., Mohr D. N. The Enterprise Data Trust at Mayo Clinic: a semantically integrated

warehouse of biomedical data, *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 131–135.

6. Verma R., Harper J. Life cycle of a data warehousing project in healthcare, *Journal of healthcare information management*, 2001, vol. 15, no. 2, pp. 107–117.

7. Kerkri E. M., Quantin C., Allaert F. A., Cottin Y., Charve P., Jouanot F., Yetongnon K. An approach for integrating heterogeneous information sources in a medical data warehouse, *Journal of Medical Systems*, 2001, vol. 25, no. 3, pp. 167–176.

8. Kamal J., Liu J., Ostrander M., Santangelo J., Dyta R., Rogers P., Mekhjian H. S. Information warehouse — a comprehensive informatics platform for business, clinical, and research applications, *AMIA Annual Symposium Proceedings*, 2010, no. 13, pp. 452–456.

9. Grant A., Moshyk A., Diab H., Carona P., Fabien de Lorenzi, Bissona G., Menarda L., Lefebvre R., Gauthier P., Grondin R., Desautels M. Integrating feedback from a clinical data warehouse into practice organization, *International Journal of Medical Informatics*, 2006, vol. 75, no. 3–4, pp. 232–239.

10. Cao X., Wong S. T., Kent S., Tjandra D. C., Lowenstein D. H. A web-based federated neuroinformatics model for surgical planning and clinical research applications in epilepsy, *Neuroinformatics*, 2004, vol. 2, no. 1, pp. 101–117.

11. Livne O. E., Schultz N. D., Narus S. P. Federated Querying Architecture with Clinical & Translational Health IT Application, *Journal of medical systems*, 2011, vol. 35, no. 5, pp. 1211–1224.

12. Erdal B. S., Liu J., Ding J., Chen J., Marsh C. B., Kamal J., Clymer B. D. A Database De-identification Framework to Enable Direct Queries on Medical Data for Secondary Use, *Methods of information in medicine*, 2012, vol. 51, no. 3, pp. 229–241.

13. Silver M., Sakata T., Su H. C., Herman C., Dolins S. B., O'Shea M. J. Case study: how to apply data mining techniques in a healthcare data warehouse, *Journal of healthcare information management*, 2001, vol. 15, no. 2, pp. 155–164.

14. Chen Y., Matsumura Y., Nakagawa K., Ji S., Nakano H., Teratani T., Zhang Q., Mineno T., Takeda H. Analysis of yearly variations in drug expenditure for one patient using data warehouse in a hospital, *Journal of medical systems*, 2007, vol. 31, no. 1, pp. 17–24.

15. Zhou X., Chen S., Liu B., Zhang R., Wang Y., Li P., Guo Y., Zhang H., Gao Z., Yan X. Development of traditional Chinese medicine clinical data warehouse for medical knowledge discovery and decision support, *Artificial Intelligence in Medicine*, 2010, vol. 48, no. 2–3, pp. 139–152.

16. Cho I. S., Haug P. J. The contribution of nursing data to the development of a predictive model for the detection of acute pancreatitis, *Stud Health Technol Inform.*, 2006, no. 122, pp. 139–142.

17. Botsis T., Anagnostou V. K., Hartvigsen G., Hripcsak G., Weng C. Developing a multivariable prognostic model for pancreatic endocrine tumors using the clinical data warehouse resources of a single institution, *Applied Clinical Informatics*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 38–49.

18. Hollis J. Deploying an HMO's data warehouse, *Health management technology*, 1998, vol. 19, no. 8, pp. 46–48.

19. Sim I., Gorman P., Greenes R. A., Haynes R. B., Kaplan B., Lehmann H., Tang P. C. Clinical decision support systems for the practice of evidence-based medicine, *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2001, vol. 8, no. 6, pp. 527–534.

20. Moja L., Friz H. P., Capobussi M., Kwag K., Banzi R., Ruggiero F., González-Lorenzo M., Liberati E. G., Mangia M., Nyberg P., Kunnamo I., Cimminiello C., Vighi G., Grimshaw J., Bonovas S. Implementing an evidence-based computerized decision support system to improve patient care in a general hospital:

the CODES study protocol for a randomized controlled trial, *Implementation Science*, 2016, no. 11:89, pp. 1–10.

21. Gribova V. V., Kleshhev A. S., Moskalenko F. M., Timchenko V. A., Fedorishhev L. A., Shalfeeva E. A. *Upravljajemaja grafovyimi grammatikami razrabotka obolochek intellektual'nyh servisov na oblachnoj platforme IACPaaS* (Graph grammar-driven development of intelligent service shells on the IACPaaS cloud platform), *Software Engineering*, 2017, vol. 8, no.10, pp. 435–447 (in Russian).

22. Gribova V., Okun D., Petryaeva M., Shalfeeva E., Tarasov A. Ontology for Differential Diagnosis of Acute and Chronic Diseases, *Communications in Computer and Information Science*, 2018, vol. 934, pp. 152–163.

23. Gribova V. V., Petrjaeva M. V., Okun' D. B., Shalfeeva E. A. *Ontologija medicinskoj diagnostiki dlja intellektual'nyh sistem podderzhki prinjatija reshenij* (The ontology of medical diagnostics for intelligent decision support systems), *Ontology of Designing*, 2018, vol. 8, no. 1 (27), pp. 58–73 (in Russian).

24. Gribova V. V., Okun' D. B. *Ontologii dlja formirovaniya baz znanij i realizacii lechebnyh meroprijatij v medicinskih intellektual'nyh sistemah* (Ontologies for the formation of knowledge bases and the implementation of therapeutic measures in medical intelligent systems), *Information Science And Control Systems*, 2018, no. 3 (57), pp. 71–80 (in Russian).

25. Gribova V. V., Okun' D. B. *Ontologija baza znanij vosstanovitel'nogo lechenija* (Ontology of rehabilitation treatment knowledge base), *Sistemnyj analiz v medicine (SAM 2018): Materialy XII mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii pod obshh. red. V. P. Kolosova. (Blagoveshensk, 2018 g.)*, 2018, pp. 47–50 (in Russian).

26. Gel'cer B. I., Skljjar L. F., Eliseeva V. S., Shahgel'djan K. I., Markelova E. V., Emceva E. D., Beniovai S. N. *Ocenka immunologicheskikh pokazatelej pri lekarstvennoj ustojchivosti vich na fone VAART* (Evaluation of immunological parameters for drug resistance of HIV on the background of HAART), *HIV Infection and Immunosuppressive Disorders*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 54–62 (in Russian).

27. Gel'cer B. I., Shahgel'djan B. I., Kurpatov I. A., Kotelnikov V. N. *Rezul'taty modelirovaniya dolzhnyh velichin sily dyhatel'nyh myshc na osnove metodov iskusstvennogo intellekta* (The results of modeling the proper values of the strength of the respiratory muscles based on the methods of artificial intelligence), *Rossijskij fiziologicheskij zhurnal im. I. M. Sechenova*, 2018, vol. 104, no. 9, pp. 1065–1074 (in Russian).

28. Gribova V. V., Kleshhev A. S., Moskalenko F. M., Timchenko V. A., Fedorishhev L. A., Shalfeeva E. A. *Oblachnaja platforma IACPaaS dlja razrabotki obolochek intellektual'nyh servisov: sostojanie i perspektivy razvitiya* (IACPaaS cloud platform for intelligent service shell development: state and development prospects), *Programmye produkty i sistemy* (Software & Systems), 2018, vol. 31, no. 3, pp. 527–536 (in Russian).

29. Shahgel'djan K. I., Gel'cer B. I., Gmar' D. V., Krivelevich E. B., Teuk K. A., Trankovskaja L. V. *Problemy analiza dannyh medicinskoj statistiki* (Problems of medical statistics data analyzing), *Problems of Social Hygiene, Public Health and History of Medicine*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 132–136 (in Russian).

30. Gribova V. V., Petryaeva M. V., Okun D. B., Tarasov A. V. Software Toolkit for Creating Intelligent Systems in Practical and Educational Medicine, *2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)*. (Vladivostok, 18–25 Aug. 2018), IEEE Xplore, 2018, pp. 1–5.

31. Gribova V. V., Moskalenko F. M., Okun' D. B., Petrjaeva M. V. *Oblachnaja sreda dlja podderzhki klinicheskoy mediciny i obrazovaniya* (Cloud environment for the support of clinical medicine and education), *Information technologies for the Physician*, 2016, no. 1, pp. 60–66 (in Russian).

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ NEUROTECHNOLOGIES

УДК 004.03

DOI: 10.17587/it.25.107-116

А. Б. Барский, д-р техн. наук, проф., e-mail: arkbarsk@mail.ru,
Д. И. Мельник, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: mdi_dim@mail.ru,
А. В. Решетников, канд. техн. наук, доц., e-mail: andyresh2014@yandex.ru,
НИИЦ (г. Москва) ЦНИИ ВВКО Минобороны России

Нейросетевые методы управления качеством при модернизации и развитии сложных систем в условиях финансовых и технологических ограничений

Рассматривается сложная система массового обслуживания, представляющая собой комплекс взаимодействующих объектов, решающих общую задачу в соответствии с целевой функцией и с требуемыми значениями параметров обслуживания. Вводится понятие рейтинга объекта, отображающего степень его участия в обеспечении высокого качества сложной системы. Для каждого типа объектов с использованием предложений экспертов строится рейтинговая система на логической нейронной сети. С ее помощью по результатам мониторинга определяется текущий рейтинг объекта. Если рейтинг опустился ниже допустимого, объект претендует на ремонт, замену, модернизацию и пр. В условиях финансовых и технологических ограничений оптимальное решение по многим объектам принимается на основе шкалы их важности.

Ключевые слова: сложная система, объект, деградация, рейтинг объекта, логическая нейронная сеть, рейтинговая система, шкала важности

Введение

Под *сложной системой* будем понимать комплекс, как правило, функционально различных средств, объединенных для совместного решения общей задачи в соответствии с *оптимизируемой целевой функцией* [1–3]. Как на теоретическом, так и на практическом уровнях выделяется класс сложных систем, образующих многоканальные системы массового обслуживания: оборонные, энергетические, транспортные, связи, социальные и пр. В общем случае сложные системы обладают органом централизованного управления и образуют централизованную сеть, узлы которой отображают ее *объекты* [4]. Это представление является условным, так как отдельным объектом, например, справедливо считать комплекс средств связи. Таким образом, понятие "объект" может быть более широким, включающим подсистему средств и даже подсистему объектов.

Целевая функция отображает конкретное назначение сложной системы с требуемыми значениями основных параметров обслуживания

в соответствии с техническим заданием (ТЗ) на ее разработку. Относительно значений этих параметров может быть задано условие их максимизации или минимизации. Это и имеется в виду, когда говорят об оптимизации целевой функции. Например, требуется создать комбинированную сложную систему связи с минимальным временем и с максимальной вероятностью выполнения заявки, соответственно не выше и не ниже заданных значений.

Целевая функция отражает текущие технологические и финансовые возможности. Достижение заданных критериев, обусловленных целевой функцией, говорит о *максимальном качестве обслуживания* сегодня. Тогда очевидно, что перспективное планирование развития сложных систем требует своевременного обоснования финансируемых направлений исследования и разработок.

На начальном этапе эксплуатации системы могут приниматься решения об уточнении ТЗ, о доработке средств и методик испытаний и пр.

Для оптимизации целевой функции целесообразно ввести строго не определяемое поня-

тие *текущего качества* объекта как во многом интуитивную, не измеряемую степень его участия в достижении требуемого максимального качества функционирования (обслуживания) сложной системы в целом. Такие оценки определяют *текущий рейтинг объекта*, который находится экспертным путем.

В общем случае сложная система обладает конечным жизненным циклом, в течение которого, в результате ее деградации, предоставляемое ею качество обслуживания падает до недопустимого уровня. Продление жизни по результатам мониторинга или в соответствии с планом регламентных работ достигается за счет ремонта и замены отдельных объектов. Однако продления жизни недостаточно, и задача ставится шире: о модернизации и развитии системы в соответствии с современными требованиями, уточняющими целевую функцию, а также с учетом финансовых, технических и технологических возможностей. Модернизация системы противостоит двум основным процессам деградации: "физическому" старению и старению моральному. Однако в процессе эксплуатации сложной системы могут вскрываться конструктивные недоработки объектов и их средств управления, а также ошибки программного обеспечения.

Таким образом, необходимо управлять поддержанием и развитием качества (обслуживания) сложной системы.

Идея такого управления заключается в следующем.

1. Организуется периодический контроль объектов сложной системы.

2. Для каждого объекта определяется его текущий *рейтинг* в системе на основе оценки качества выполнения его функций в соответствии с техническими требованиями (ТТ) к системе.

3. Если этот рейтинг опустился ниже допустимого уровня, данный объект нуждается в принятии решения о ремонте, замене, смене технологии его изготовления, об изменении алгоритма функционирования системы и др.

4. Однако в условиях ограниченного финансирования и доступности технологий решение принимается по некоторой стратегии комплексно, по множеству объектов недопустимо низкого рейтинга с учетом *шкалы важности*. При этом, чтобы удовлетворить потребности большего числа "важных" объектов, замена может выполняться по принципу "из того что есть и подешевле".

1. Рейтинг объектов сложной системы

В основе определения рейтинга отдельного объекта сложной системы лежит ряд показателей, образующих *вектор характеристик качества*. Как правило, значение этих характеристик или их ограничения обусловлены техническими требованиями (ТТ) или техническим заданием (ТЗ) на разработку системы [5]. К такому уточняемому и расширяемому ряду показателей качества могут относиться:

- пропускная способность или реальная производительность объекта;
- реальная производительность встроенных вычислительных средств объекта;
- среднее время обслуживания запроса;
- вероятность обслуживания;
- частота неудачного решения своей частной задачи;
- частота или число ложных срабатываний объекта;
- частота отказов объекта с переходом (с требованием перехода) на резерв;
- теоретический расчет текущей надежности объекта, например, при пуассоновском потоке отказов;
- приближение теоретически рассчитанного или объявленного разработчиком срока жизненного цикла объекта;
- применение в основе разработки объекта зарубежной технологии, ставшей "запрещенной";
- снижение отказоустойчивости;
- снижение уровня помехозащищенности;
- нарушение безопасности вычислений встроенных вычислительных средств;
- неудовлетворительные результаты функционального контроля и др.

Для снижения трудоемкости исследования возможно укрупнение объектов — их объединение в сложные объекты или разбиение всей системы на подсистемы, интерпретируемые как отдельные объекты. Это требует введения некоторой "рейтинговой" алгебры объединения объектов:

1. Два объекта участвуют в работе сложной системы по схеме "И", если их совместная функция не может быть выполнена ими по разнь. Тогда

$$\begin{aligned} & \text{Рейтинг}(\text{объект1}) \text{ И } (\text{объект2}) = \\ & = \min \{ \text{рейтинг}(\text{объект1}), \text{рейтинг}(\text{объект2}) \}. \end{aligned}$$

2. Два объекта участвуют в работе сложной системы по схеме "ИЛИ", если их совместная

функция может быть выполнена хотя бы одним из них. Тогда

$$\text{Рейтинг}((\text{объект1}) \text{ ИЛИ } (\text{объект2})) = \\ = \max \{ \text{рейтинг}(\text{объект1}), \text{рейтинг}(\text{объект2}) \}.$$

Укрупнение объектов тем более актуально, что характер их взаимодействия часто не позволяет чисто механически проводить замену одного объекта более совершенным. Отсутствие сопряжения некоторых характеристик (например, более высокая пропускная способность "нового" объекта) приводит к дисбалансу и к необходимости перенастройки всей подсистемы.

2. Рейтинговая система на основе интервалов значений показателей качества объектов сложной системы

Построение рейтинговых систем как класса систем принятия решений на основе аппарата логических нейронных сетей показано в работе [6]. Отметим, что все системы принятия решений строятся на однослойных нейронных сетях. Их обработка сводится к простейшей обработке легко модифицируемых матриц следования.

Рассмотрим пример построения типовой рейтинговой системы.

Пусть для данного типа объектов задан вектор характеристик качества $\{D_1, D_2, D_3, D_4\}$. Диапазон изменения каждой характеристики (типа *real*) на основе экспертных рекомендаций разбит на три интервала (строго математически, интервалы — полузакрытые или закрытые), принадлежность которым говорит о неизменном рейтинге по данной характеристике на данном интервале ее значений:

$$D_i \rightarrow [d_{i0} - d_{i1}), [d_{i1} - d_{i2}), [d_{i2} - d_{i3}], i = 1, \dots, 4.$$

В частности, исходя из смысла d_{i3} может быть равно 0 или ∞ .

Интервал $[d_{i0} - d_{i1})$ соответствует диапазону значений характеристики D_i (например, производительности), обусловленной ТЗ. Интервал $[d_{i1} - d_{i2})$ соответствует временно допустимому значению этой характеристики. Интервал $[d_{i2} - d_{i3}]$ соответствует области значений характеристики D_i , где измерения не проведены, либо их значения ниже допустимых (например, производительность снизилась до нуля).

Пусть для построенных интервалов, рассматриваемых совместно как возможные си-

туации на основе вектора характеристик, эксперты установили значения рейтинга из некоторого множества значений: *рейтинг высокий*, *рейтинг средний*, *рейтинг низкий*. Иными словами, для каждой возможной ситуации, описываемой множеством из четырех интервалов, соответствующих каждый своей характеристике, задано одно из трех значений рейтинга.

Отобразим на схеме (рис. 1) пример такого соответствия, причем все возможные связи воспроизводить не следует, так как низкий рейтинг проявится даже во многих не указанных случаях.

От статического описания базы знаний (БЗ), содержащей связи "ситуация \rightarrow рейтинг", перейдем к динамической модели ассоциативного мышления, сформировав логическую нейронную сеть. Для этого предположим, что левый столбец пронумерованных овалов соответствует рецепторам, возбуждаемым извне, а правый — нейронам, возбуждение которых от связанных с ними рецепторов указывает на значение рейтинга.

Напомним, что возбуждение рецепторов интерпретируется как достоверность высказываний о принадлежности данных, а нейрон представляет собой прибор, выполняющий пороговую функцию активации.

Ситуация же представляет собой набор в данном случае четырех значений характеристик объекта, принадлежащих соответствующим интервалам.

Для "оживления" модели введем пороговую функцию активации нейрона. Для данного прибора такая функция имеет вид:

$$V_i = \begin{cases} \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 v_{jk}, & \text{если эта величина} \\ \text{не меньше значения порога } h, & \\ 0, & \text{в противном случае } (i = 1, \dots, 11). \end{cases}$$

Здесь V_i — возбуждение i -го нейрона; v_{jk} ($k = 1, \dots, 4, j_k \in \{1, \dots, 12\}$) — возбуждение одного из четырех рецепторов, связанных с i -м нейроном. Порог h выбирается экспериментально в процессе эксплуатации рейтинговой системы так, чтобы исключить лишние вычисления.

Для иллюстрации выберем некоторый объект, т. е. некоторую ситуацию, заданную конкретными значениями характеристик качества. Не вдаваясь в "физический смысл", предположим, что значение d_1 характеристики D_1 принадлежит интервалу $[d_{10} - d_{11})$. Задаем

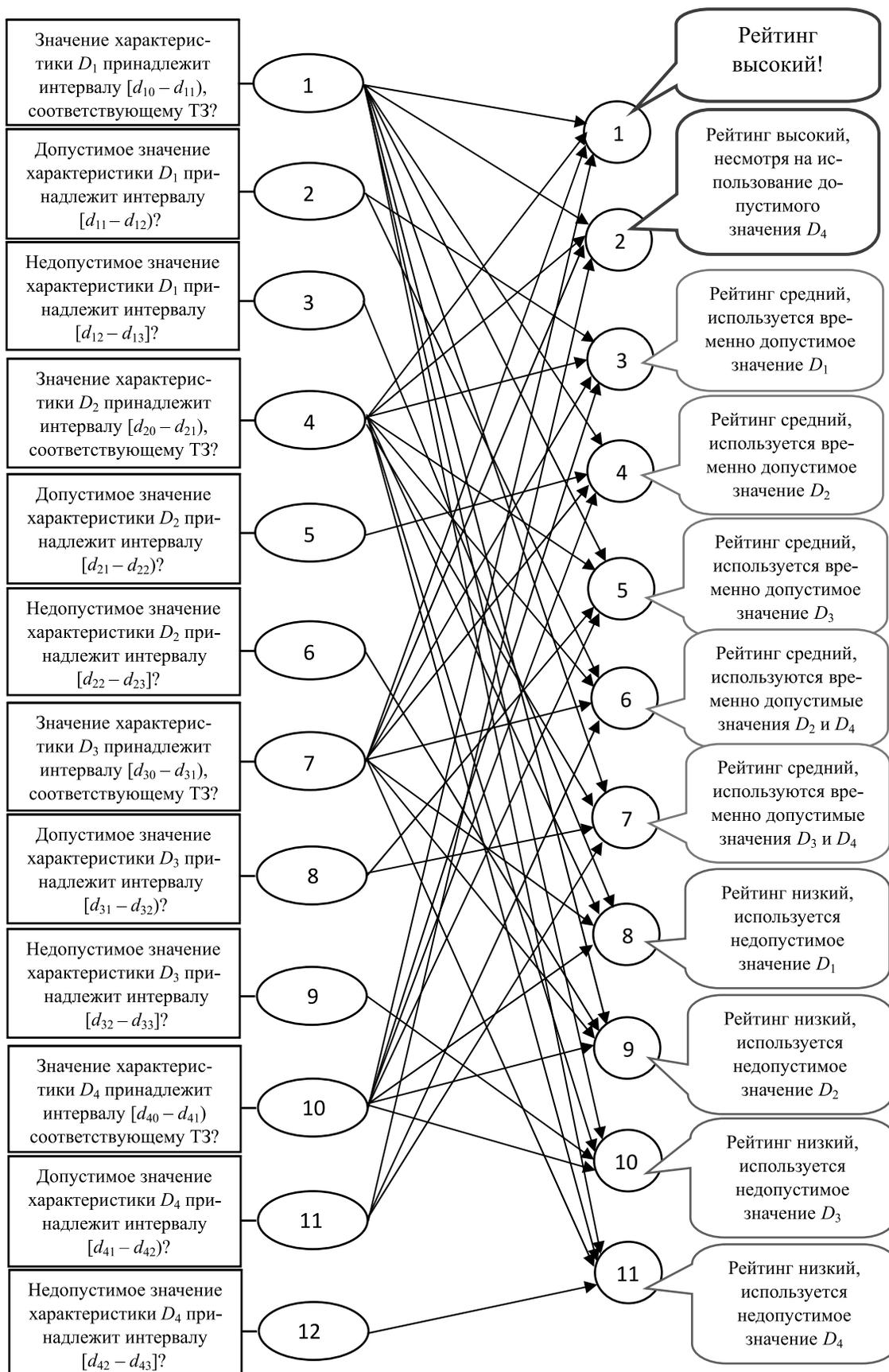


Рис. 1. Логическая нейронная сеть рейтинговой системы

возбуждение рецептора: $v_1 = 1$. Пусть точно не определена принадлежность значения d_2 характеристики D_2 , однако есть предположение, что с вероятностью 0,6 это значение принадлежит интервалу $[d_{20} - d_{21})$, а с вероятностью 0,4 — интервалу $[d_{21} - d_{22})$. Возбуждаем рецепторы: $v_4 = 0,6$, $v_5 = 0,4$. Пусть известно, что значение d_3 характеристики D_3 принадлежит интервалу $[d_{30} - d_{31})$, а значение d_4 характеристики D_4 принадлежит интервалу $[d_{40} - d_{41})$. Полагаем $v_7 = v_{10} = 1$. Пусть из соображений трудоемкости дальнейшего анализа экспериментально выбран порог $h = 0,7$. Рассчитаем значение функции активации всех нейронов: $V_1 = 0,9$, $V_2 = V_3 = 0$, $V_4 = 0,85$, $V_5 = V_6 = V_7 = V_8 = V_9 = V_{10} = V_{11} = 0$. Максимально возбуждшийся нейрон 1 формально указывает на высокий рейтинг объекта. Однако тревожность ситуации нельзя не заметить по высокому возбуждению нейрона 4, указывающего на средний рейтинг.

В рассмотренной рейтинговой системе вместо интервалов могут указываться данные типа *integer*, *Boolean* в любой комбинации, могут быть указаны объекты, входящие в данный объект, и т. д. Так, например, может учитываться наличие или отсутствие аппаратного контроля

вычислительных средств, применение кодов, корректирующих ошибки, наличие и состояние специальных подъездных путей и др.

Развитие рейтинговой системы связано с введением весов связей как степени влияния разных характеристик качества или даже их значений на общий показатель рейтинга объекта. Как правило, эти веса определяются в результате длительной эксплуатации системы. Не желая загромождать рис. 1, легко представить на стрелках, наличие которых указывает на единичные веса, веса ω_{ji} ($0 < \omega_{ji} < 1$) связей, ведущих от j -го рецептора к i -му нейрону. С учетом весов связей функция активации i -го нейрона имеет следующий вид:

$$V_i = \begin{cases} \left(\frac{\sum_{k=1}^4 \omega_{jk} v_{jk}}{\sum_{k=1}^4 \omega_{jk}} \right), & \text{если это отношение не меньше} \\ & \text{значения порога } h, \\ 0, & \text{в противном случае } (i = 1, \dots, 11). \end{cases}$$

При обработке логической нейронной сети используется *матрица связей*. Для данного примера, но для случая, когда некоторые веса меньше единицы (выяснилось в процессе эксплуатации), такая матрица имеет вид, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Матрица связей, примерный вид

Рецепторы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Решение нейрона 1	1			1			1			1		
Решение нейрона 2	1			1			1				1	
Решение нейрона 3		1		1			1			1		
Решение нейрона 4	1				1		1			0,8		
Решение нейрона 5	1			1				1		1		
Решение нейрона 6		1		1			1				1	
Решение нейрона 7	1			1				1			1	
Решение нейрона 8			1	1			1			0,9		
Решение нейрона 9	1					1	1			1		
Решение нейрона 10	1			1					1	1		
Решение нейрона 11	1			1			1					1

3. Отображение на экране системы концентрических областей одинакового рейтинга

Наглядное отображение рейтинга объекта на экране основано на попадании точки, соответствующей характеристикам объекта, в некоторую рейтинговую область (рис. 2, см. третью сторону обложки). Однако в этом случае затруднены текстовые комментарии к выводам, объясняющие принимаемые решения о рейтинге, как это показано на рис. 1.

Для построения системы концентрических рейтинговых областей используется плоская, "сплюснутая" по размеру экрана сферическая система координат. Каждая точка характеризуется значением радиуса r и угла φ .

В рейтинговых областях сначала произвольно размещаются точки, которым затем ставятся в соответствие условные объекты-эталоны с численными значениями показателей качества. Так формируются связи "вектор значений показателей качества — сферические координаты точки на экране". В результате нейросе-

тевой обработки испытываемого объекта с его показателями качества в соответствующей ему рейтинговой области формируется точка.

В работе [6] рассмотрен пример возможного банковского мониторинга с помощью концентрических рейтинговых областей. В качестве эталонных банков различного рейтинга там могли использоваться как существующие, так и предполагаемые банки в соответствии с оценкой экспертов. Так как в рассматриваемой постановке задачи не допускается существование действующей сложной системы с низким рейтингом, то за эталоны должны приниматься условные объекты, для которых численные характеристики качества входят в указанные выше интервалы, образуя варианты этих объектов различного рейтинга. Таким образом, множество эталонных объектов различного рейтинга, соответствующих точкам R_1, \dots, R_{13} на экране, строится с помощью логической нейронной сети (см. рис. 1).

Продолжая рассмотрение примера, предположим, что значения характеристик $a_{11} \in [d_{10}, d_{11})$, $a_{21} \in [d_{20}, d_{21})$, $a_{31} \in [d_{30}, d_{31})$, $a_{41} \in [d_{40}, d_{41})$ определяют эталонный вариант 1 исследуемого объекта, которому на экране соответствует точка $R_1(r_1, \varphi_1)$ в области *высокого рейтинга*.

Предположим, что тем же интервалам принадлежат значения характеристик $a_{12}, a_{22}, a_{32}, a_{42}$, определяющие эталонный вариант 2 исследуемого объекта, которому на экране соответствует точка $R_2(r_2, \varphi_2)$ в области *высокого рейтинга*. То же предположим относительно значений характеристик $a_{13}, a_{23}, a_{33}, a_{43}$, определяющих эталонный вариант 3 исследуемого объекта, которому на экране соответствует точка $R_3(r_3, \varphi_3)$ в области *высокого рейтинга*. Для точки $R_4(r_4, \varphi_4)$ предположим, что значение a_{44} характеристики D_4 принадлежит интервалу $[d_{41}, d_{42})$.

Аналогично выбираются значения характеристик качества объекта, принадлежащие диапазонам их изменения, определяющим *средний рейтинг*:

пусть значения $a_{15}, a_{25}, a_{35}, a_{45}$ соответствуют точке $R_5(r_5, \varphi_5)$;

 значения $a_{18}, a_{28}, a_{38}, a_{48}$ соответствуют точке $R_8(r_8, \varphi_8)$.

Таким же образом точками объектов-эталонов $R_9(r_9, \varphi_9) - R_{13}(r_{13}, \varphi_{13})$ наполняется область *низкого рейтинга*. Точке R_9 соответствует набор значений $a_{19}, a_{29}, a_{39}, a_{49}, \dots$, точке R_{13} соответствует набор $a_{1,13}, a_{2,13}, a_{3,13}, a_{4,13}$.

Построенное соответствие векторов характеристик качества объекта точкам различного рейтинга на экране определило содержимое БЗ.

Для формирования логической нейронной сети упорядочим в порядке возрастания все значения $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1,13}$ характеристики D_1 , фигурирующие в выше приведенных построениях. Предположим, что при выборе значений характеристик качества для эталонных точек не допускалось повторение одних и тех же значений. Обозначим в новом порядке полученную возрастающую последовательность $b_{11}, \dots, b_{1,13}$. Выполним такую же операцию над всеми фигурирующими значениями характеристик D_2, D_3, D_4 . Получим возрастающие последовательности $b_{21}, \dots, b_{2,13}$; $b_{31}, \dots, b_{3,13}$; $b_{41}, \dots, b_{4,13}$. Поскольку точки R_1, \dots, R_{13} на рис. 2 выбраны произвольно, представим эти точки их столь же условными, приближительными координатами, необходимыми для несложных расчетов: $R_1(2, 60^\circ)$, $R_2(8, 15^\circ)$, $R_3(7, 210^\circ)$, $R_4(4, 310^\circ)$, $R_5(9, 120^\circ)$, $R_6(13, 20^\circ)$, $R_7(14, 200^\circ)$, $R_8(12, 320^\circ)$, $R_9(16, 120^\circ)$, $R_{10}(16, 30^\circ)$, $R_{11}(16, 330^\circ)$, $R_{12}(15, 230^\circ)$, $R_{13}(17, 170^\circ)$.

За каждым членом совокупной последовательности значений характеристик качества закрепим рецептор (рис. 3). Для данного примера требуется 52 рецептора. Введем 13 нейронов, каждый из которых своим возбуждением указывает на соответствующую точку экрана. Соединим рецепторы, определяющие отдельные точки, с нейронами, соответствующими этим точкам. Тем самым зададим единичные веса связей в полученной логической нейронной сети. Так как пример не отражает реальные показатели качества, на рис. 3 показан лишь возможный вариант связей.

Воспользуемся ранее использованной функцией активации для единичных весов связей. Однако положим $h = 0$, так как для большей точности попадания в "свою" рейтинговую область желательно сравнивать ситуацию (b_1, b_2, b_3, b_4) , рейтинг которой следует определить, с большим числом точек базы знаний.

Алгоритм оценки рейтинга объекта сложной системы

1. Находятся значения показателей качества объекта, представляющие вектор с численными значениями компонентов.
2. Проводится возбуждение рецепторов логической нейронной сети. А именно, для данного испытываемого значения b_i , где i — индекс показателя качества, находится рецептор,

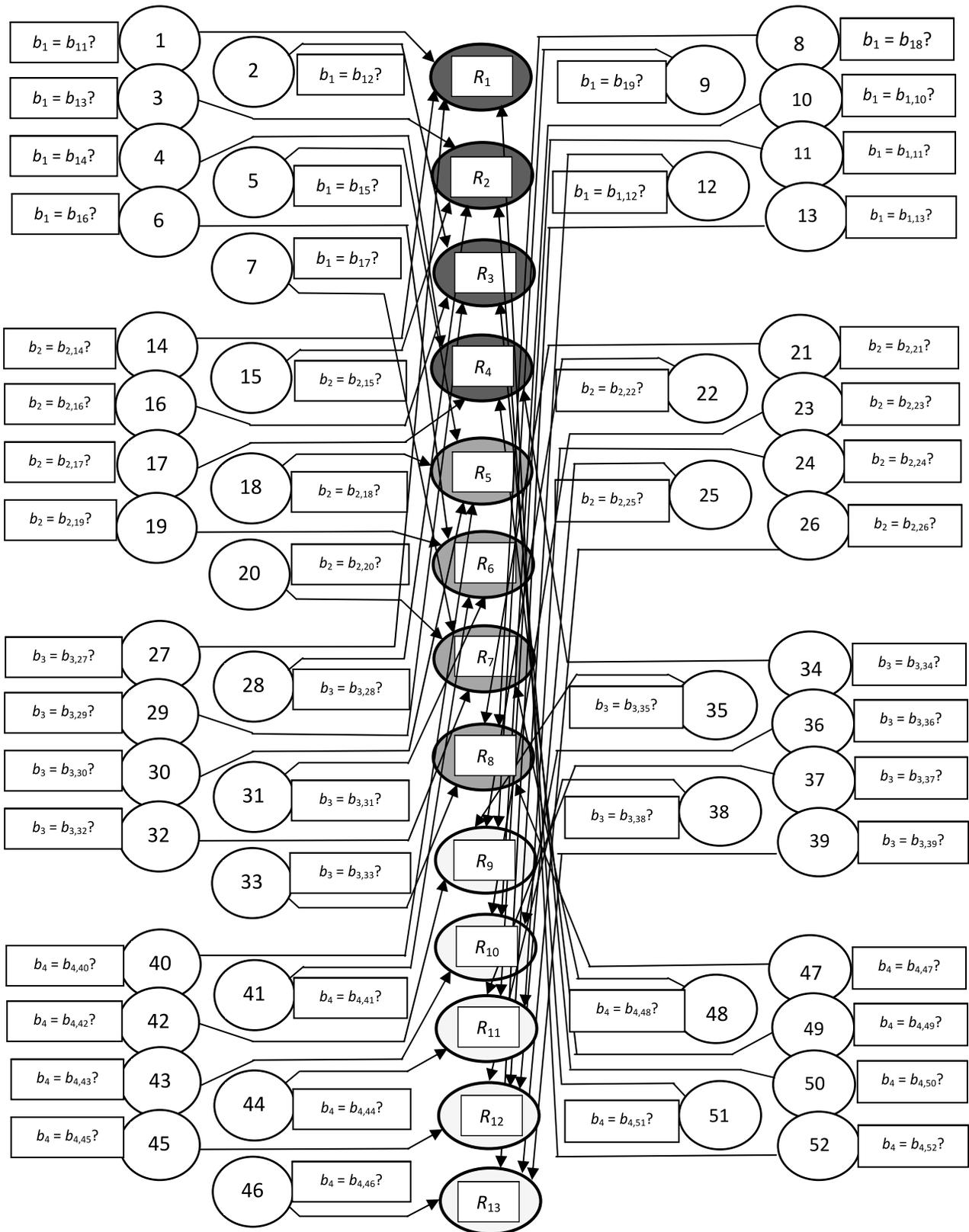


Рис. 3. Логическая нейронная сеть экранной рейтинговой системы

закрепленный за этим значением показателя. Если такой рецептор существует, значение его возбуждения принимается равным единице. Возбуждение других рецепторов данного показателя качества равно нулю. Если такого рецептора нет, находятся два рецептора, закрепленных за меньшим $b_{i\mu}$ и большим $b_{i(\mu+1)}$ значениями относительно b_i . "Единица" распределяется обратно пропорционально "расстоянию" b_i до данных рецепторов, образуя их значения возбуждения: возбуждение $b_{i(\mu+1)}$ принимается равным $(b_i - b_{i\mu}) / (b_{i(\mu+1)} - b_{i\mu})$, а возбуждение $b_{i\mu}$ дополняет это отношение до единицы. Возбуждение других рецепторов данного показателя качества остается нулевым. Так находится возбуждение рецепторов для всех показателей качества (для всех i).

3. С помощью функции активации находится возбуждение всех нейронов, каждый из которых указывает на эталонную точку экрана.

4. Для "возбудившихся" нейронов находится среднее значение радиуса r и угла φ . В качестве весов в формуле нахождения среднего (математического ожидания) используются значения возбуждения нейронов. (Благодаря выбору сферической системы координат средняя точка не выйдет за пределы рейтинговых областей, которым принадлежат усредняемые точки.)

5. Точка $R(r, \varphi)$ воспроизводится на экране, попав в некоторую область рейтинга объекта.

4. О стратегии повышения качества сложных систем

Тревожное состояние объекта, обусловленное снижением его рейтинга, служит лишь сигналом о необходимости принятия мер по ремонту, замене, модернизации и пр. Меры принимаются комплексно по состоянию всех объектов. Для этого существует или подразумевается шкала важности объектов, определяющая приоритеты при восстановлении или развитии средств сложной системы. Например, предаварийное состояние силового агрегата электростанции требует его ремонта или замены в первую очередь. Однако предаварийное состояние плотины гидроэлектростанции вызывает неотложность мер, ибо прорыв плотины ведет не к аварии, а к катастрофе.

Важную роль здесь играет человеческий фактор, неотделимый от политических, экономических и военных задач. Не следует забывать о приоритетах научных исследований.

Можно сформулировать математическую задачу оптимизации очередности принятия мер по повышению качества на основе важности объектов в условиях финансовых ограничений. Объекты следует выстроить в очередь по важности и по рейтингу и последовательно вычерпывать выделенные финансы затратами на повышение качества объектов. Однако при этом должна учитываться важность самой сложной системы, и математические выкладки вряд ли произведут впечатление на лицо, принимающее решение (ЛПР). Ведь следует учитывать ущерб, наносимый задержкой или полным отсутствием реакции на сигнал о снижении рейтинга объекта.

Таким образом, поиск оптимальной стратегии повышения качества сложной системы после установления рейтинга ее объектов превращается в конкретную, но трудно формализуемую задачу высокой сложности. Это задача о разработке системы принятия решений на основе анализа многих информационно трудно совместимых факторов, характеризующихся нечеткими данными. Представляется, что аппарат логических нейронных сетей направлен именно на разработку таких систем принятия решений.

Заключение

1. Управление качеством сложной системы направлено на своевременное принятие мер по сохранению и развитию высоких показателей многоканального обслуживания и, прежде всего, по удовлетворению высокой пропускной способности и производительности, а также высокой надежности и безопасности.

2. Мониторинг качества обслуживания способствует обоснованию технической политики по разработке базовых средств сложных систем, а также по планированию фундаментальных и прикладных исследований.

3. Большое число факторов, лежащих в основе функционирования сложных систем, их целевое, технологическое и типовое разнообразие, неполная возможность численных оценок превращают задачу управления качеством в трудно формализуемую задачу высокой сложности. При решении подобных задач целесообразно применять такие методы и средства искусственного интеллекта, как логические нейронные сети, с использованием экспертных оценок там, где объективные численные измерения невозможны.

4. Для каждого типа средств, входящих в состав сложной системы, составляется своя рейтинговая система на основе логической нейронной сети. При этом используются характеристики, свойственные данному типу средств: вычислительных, оборонных, энергетических, строительных и транспортных сооружений и т. д.

5. Подчеркнем, что логические нейронные сети строятся обученными, так как реализуют систему принятия решений на основе развиваемой базы знаний (БЗ). Отсутствует этап обучения как основная теоретическая проблема, свойственная "классическим" нейронным сетям. Для начального заполнения БЗ, т. е. для некоторого множества точек факторного пространства (ситуаций) и принимаемых по ним успешных решений, используется накопленный опыт или оценки экспертов.

6. Весьма важно то, что в процессе эксплуатации логической нейронной сети в составе рейтинговой системы эта система (ее база знаний) легко развивается, уточняются веса связей, а решения модифицируются для большей результативности.

7. По установленным экспертами условным весам средств системы и на основе текущих

рейтингов отдельных объектов по формуле нахождения среднего может быть получен *рейтинг сложной системы*. Однако он свидетельствует лишь о качестве работы *этой* системы и не может служить абсолютной мерой качества при сравнении с другими, даже аналогичными системами, в том числе с системой "идеальной". Ведь все системы обладают своей целевой функцией!

Список литературы

1. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
2. Шаракшанэ А. С., Железнов И. Г., Ивницкий В. А. Сложные системы. М.: Высшая школа, 1977. 246 с.
3. Шаракшанэ А. С., Халецкий А. К., Морозов И. А. Оценка характеристик сложных автоматизированных систем. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
4. Григоренко В. М., Мельник Д. И. Основные проблемы моделирования систем и средств воздушно-космической обороны на основе перспективных информационных технологий // Военная мысль. 2015. № 6. С. 62—67.
5. Барский А. Б., Железнов Б. В., Шаменков Н. А. Высоконадежные управляющие компьютерные сети с нейросетевой адаптивной маршрутизацией на базе перспективных моделей серии "Эльбрус" // Информационные технологии. 2018. Т. 24, № 5. С. 291—299.
6. Барский А. Б. Нейросетевые методы оптимизации решений. СПб.: ИЦ "Интермедия", 2016. 312 с.

A. B. Barsky, D. Sc., Professor, e-mail: arkbarsk@mail.ru,

D. I. Melnik, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: mdi_dim@mail.ru,

A. V. Reshetnikov, Ph. D., Associate Professor, e-mail: andyresh2014@yandex.ru,

Scientific Research Institute (Moscow) Central Research Institute VVKO, Ministry of Defense of Russia

Neural Network Methods of Quality Management during the Modernization and Development of Complex Systems in the Context of Financial and Technological Constraints

A complex queuing system is considered, as a complex of interacting tools that solve a common problem in accordance with the objective function and with the required values of the service parameters. The objective function displays the specific purpose of a complex system with the required values of the main service parameters in accordance with the terms of reference for its development. Concerning the values of these parameters, the condition of their maximization or minimization can be specified. Modernization of the system counteracts two main processes of degradation: "physical" aging and moral aging. However, during the operation of a complex system, structural defects of facilities and their controls, as well as software errors, may be revealed. In the general case, complex systems have a centralized management body and form a centralized network, the nodes of which display individual objects. The concept of object rating is introduced, which reflects the degree of its participation in providing high quality of a complex system. For each type of objects, using the suggestions of experts, a rating system is built on the logical neural network. With its help, the monitoring results determine the current rating of the object. If the rating has fallen below acceptable, the object claims to be repaired, replaced, upgraded, etc. In the conditions of financial and technological constraints, the optimal decision on many objects is made on the basis of the scale of their importance.

Keywords: complex system, object, degradation, object rating, logical neural network, rating system, scale of importance

DOI: 10.17587/it.25.107-116

References

1. **Buslenko N. P.** *Modelirovanie slozhnykh sistem* (Modeling complex systems), Moscow, Nauka, 1978, 400 p. (in Russian).
2. **Sharakhshane A. S., Zheleznov I. G., Ivnickij V. A.** *Slozhnye sistemy* (Complex systems), Moscow, Vysshaya shkola, 1977, 246 p. (in Russian).
3. **Sharakhshane A. S., Haleckij A. K., Morozov I. A.** *Ocenka harakteristik slozhnykh avtomatizirovannykh sistem* (Evaluation of the characteristics of complex automated systems), Moscow, Mashinostroenie, 1993, 272 p. (in Russian).
4. **Grigorenko V. M., Mel'nik D. I.** *Osnovnye problemy modelirovaniya sistem i sredstv vozdushno-kosmicheskoy oborony na osnove perspektivnykh informacionnykh tehnologij* (The main problems of modeling systems and means of aerospace defense based on advanced information technologies), *Voennaya mysl'*, 2015, no. 6, pp. 62–67 (in Russian).
5. **Barskij A. B., Zhelenkov B. V., Shamenkov N. A.** *Vysokonadyyzhnyye upravlyayushhie komp'yuternye seti s nejrosetevoj adaptivnoj marshrutizaciej na baze perspektivnykh modelej serii "El'brus"* (Highly reliable control computer networks with neural network adaptive routing based on promising models of the Elbrus series), *Informacionnye Tehnologii*, 2018, vol. 24, no. 5, pp. 291–299 (in Russian).
6. **Barskij A. B.** *Nejrosetevye metody optimizacii reshenij* (Neural network methods for optimizing solutions), SPb, IC "Intermediya", 2016, 312 p. (in Russian).

УДК 004.023, 004.8

DOI: 10.17587/it.25.116-127

О. С. Амосов, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., e-mail: osal18@yandex.ru,
С. Г. Амосова, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр., e-mail: amosovasg@yandex.ru,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
Ю. С. Иванов, канд. техн. наук, доц., e-mail: ivanov_ys@icloud.com,
С. В. Жиганов, аспирант, e-mail: zhiganov@knastu.ru,
Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Моделирование интеллектуальной системы контроля и управления доступом транспортных средств с использованием глубоких нейронных сетей¹

Разработана математическая модель интеллектуальной системы контроля и управления доступом транспортных средств на некоторую территорию. Предложено выполнение локализации транспортного средства с помощью глубокой нейронной сети YOLO, что позволяет дополнительно определить тип объекта доступа. Решение задачи локализации и распознавания номерного знака основано на композиции традиционных методов обработки изображений и двухпроходной классификации, выполняемой модифицированной архитектурой сверточной нейронной сети MobileNet. Экспериментально доказано, что применение разработанного подхода дает процент правильных распознаваний номерных знаков на видеопотоке не ниже 96 % в зависимости от внешних условий. Комплекс программ реализован на языке Python.

Ключевые слова: математическая модель, система контроля и управления доступом, транспортное средство, локализация, распознавание, сверточная нейронная сеть, MobileNet

Введение

Современная система контроля и управления доступом (СКУД) транспортных средств (ТС) на охраняемую территорию должна обеспечивать их идентификацию и ограничение доступа. Основные визуальные признаки, описывающие объект доступа (ОД) — автомобиль:

цвет и тип кузова; марка, модель; категория и номерной знак (НЗ).

В работе [1] в качестве идентификационных признаков ТС предлагается использовать информацию о цвете автомобиля, однако такой подход затруднен в вечернее и ночное время, когда камера наблюдения переходит в черно-белый режим.

Авторами [2] предлагается метод распознавания марки и модели в условиях ограниченного освещения в ночное время. Но такой метод не может быть применен в СКУД как основной классификатор.

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России научного проекта — государственного задания в рамках проектной части № 2.1898.2017/4.6 "Создание математического и алгоритмического обеспечения интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы безопасности вуза".

В последнее время хорошие результаты в оптическом распознавании образов достигаются с помощью использования искусственных нейронных сетей (НС) [3, 4]. В работе [5] приводится сравнение различных нейросетевых алгоритмов для задачи распознавания рукописных цифр.

Авторами статьи [6] предлагается использование каскадной архитектуры из сверточной НС и сети с долго- и кратковременной памятью (long short-term memory, LSTM). Основным преимуществом такого подхода является отсутствие этапа сегментации, но при этом возникают дополнительные требования к вычислительным ресурсам, в частности к объему памяти.

В работе [7] предлагалось использовать три глубоких нейросети (Deep Neural Network) для детекции НЗ, локализации символов и их распознавания, однако используемые архитектуры также не позволяли работать в режиме реального времени (РВ).

Основным недостатком предлагаемых ранее систем являются высокие требования к вычислительным ресурсам, что затрудняет использование их в РВ для отслеживания нештатных ситуаций. Из последних достижений в области глубокого обучения стоит отметить архитектуру НС MobileNet [8], которая обладает низкими требованиями к вычислительным ресурсам, однако для решения задачи распознавания НЗ ТС ранее не применялась. Поэтому наиболее перспективным представляется использование глубоких НС [8, 9] для построения систем распознавания НЗ. При этом существует необходимость разработки подхода, который позволит обрабатывать каждый кадр видеопотока в РВ в штатной и нештатной ситуациях на основе совмещения технологий глубокого обучения и традиционных методов обработки изображений. По этой причине в данной статье предлагается модель интеллектуальной СКУД ТС на основе нового алгоритма локализации и распознавания НЗ ТС путем двухпроходной классификации с использованием сверточной НС с модифицированной архитектурой, что позволило получить высокую точность распознавания без потери скорости в режиме РВ.

1. Постановка задачи

Необходимо разработать математическую модель интеллектуальной СКУД ТС и применить разработанную модель для формализо-

ванного описания возможных штатных и нештатных ситуаций. Для распознавания ситуаций применить методы компьютерного зрения на базе сверточных НС. Требуется разработать комплекс программ в среде Python и провести натурный эксперимент с кадрами, поступающими с камеры наблюдения (КН) системы безопасности предприятия.

Математическая формулировка задачи контроля и управления доступом. В работе [10] нами предлагается структурная схема интеллектуальной СКУД на основе кибернетического подхода для задачи доступа ТС на территорию организации. В этой схеме контрольно-пропускной пункт (КПП) состоит из устройства управления (УУ), управляемого преграждающего устройства (УПУ), камеры наблюдения и устройств внешней подсветки (УВП). Необходимо при появлении на КПП объекта доступа разрешить или запретить ему доступ на охраняемую территорию с учетом воздействия внешней среды (ВС) и записать событие в базу данных (БД). Тогда математическая формулировка задачи контроля и управления доступом выглядит так.

Пусть имеются вектор состояний СКУД $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_{\text{ОД}}^T, \mathbf{x}_{\text{КН}}^T, x_{\text{УПУ}}, x_{\text{УВП}}, \mathbf{x}_{\text{ВС}}^T)^T$, где $\mathbf{x}_{\text{ОД}}^T$ — вектор состояний объекта доступа; $\mathbf{x}_{\text{КН}}^T$ — вектор состояний камеры наблюдения; $x_{\text{УПУ}}$ — состояние управляемого преграждающего устройства; $x_{\text{УВП}}$ — состояние устройства внешней подсветки; $\mathbf{x}_{\text{ВС}}^T$ — вектор состояний внешней среды; и вектор выходных сигналов (измерений) для СКУД $\mathbf{y} = (\mathbf{y}_{\text{ОД}}^T, y_{\text{НВ}}, y_{\text{УПУ}}, y_{\text{УВП}}, \mathbf{y}_{\text{ВС}}^T)^T$, где $y_{\text{НВ}}$ — наличие кадра $\mathbf{I}^t = \mathbf{V}(t)$ с камеры наблюдения видеопотока \mathbf{V} , представленного многомерным массивом; $\mathbf{y}_{\text{ОД}}^T$ — сигнал с КН, причем $\mathbf{y}_{\text{ОД}}^T = \mathbf{I}^t$; $y_{\text{УПУ}}$ — сигнал с УПУ; $y_{\text{УВП}}$ — сигнал с УВП; $\mathbf{y}_{\text{ВС}}^T$ — вектор сигналов с датчиков, фиксирующих состояние ВС. Необходимо по результатам наблюдений \mathbf{y} состояний ОД \mathbf{x} выработать оценки состояний $\tilde{\mathbf{x}}$ и необходимые управляющие воздействия \mathbf{u} на объект управления, $\mathbf{u} = (u_{\text{УПУ}}, u_{\text{УВП}}, u_{\text{БД}})^T$, где $u_{\text{УПУ}}$ — сигнал на открытие или закрытие управляемого преграждающего устройства, $u_{\text{УВП}}$ — сигнал на устройство внешней подсветки, $u_{\text{БД}}$ — сигнал на запись события в базу данных. Каждый из элементов принадлежит соответствующему множеству: состояний $\mathbf{x} \in X$, их оценок $\tilde{\mathbf{x}} \in \tilde{X}$, видеопотоков $\mathbf{V} \in V$, выходных сигналов $\mathbf{y} \in Y$ и управлений $\mathbf{u} \in U$. T — множество моментов времени, $t \in T$ — произвольный момент времени. Функциональные зависимости на X , Y и U могут быть представлены в виде отображений

"вход—состояние" $F_1: T \times U \rightarrow X$ и "состояние—выход" $F_2: T \times X \rightarrow Y$, т. е. $y(t) = F_2(F_1(u(t)))$.

Таким образом, ставится задача по кадру видеопотока определить состояние системы, включающее наличие объекта доступа (НОД), тип объекта доступа (ТОД), наличие кодового признака (НКП), состояние качества кодового признака (СКП) и его значение (ЗКП) с использованием отображения $F_3: V \rightarrow \tilde{X}$. Тогда отображение F_3 , реализующее функцию оптимального нелинейного фильтра (НФ) для оценки состояния ОД [11, 12], можно представить в виде $\tilde{x}_{ОД} = F_3(I')$, $\tilde{x}_{ОД} = (\tilde{x}_{НОД}, \tilde{x}_{ТОД}, \tilde{x}_{НКП}, \tilde{x}_{СКП}, \tilde{x}_{ЗКП})^T$.

По параметрам $\tilde{x}_{ОД}$ элемент сравнения проверяет вхождение ОД в базу разрешенных D^{allow} из задающего устройства (ЗУ) и определяет штатную или нештатную ситуацию в соответствии с выражением

$$s = F_4(\tilde{x}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{x} \in D^{allow}, \\ 0, & \text{если } \tilde{x} \notin D^{allow}, \end{cases}$$

где $s = \{0, 1\}$ — штатная или нештатная ситуация. Наличие отклонения одного из параметра состояния объекта доступа от заложенных в D^{allow} возможных значений для каждого ОД переводит систему в режим нештатной ситуации.

На рис. 1 представлена математическая модель СКУД.

Воздействия u на устройства управления УВП и УПУ описываются отображением $F_5: \tilde{X} \rightarrow U$ и могут быть представлены набором правил базы знаний (БЗ) [10]. Например, если значение кодового признака объекта доступа есть в БД, то необходимо его пропустить и внести запись в БД:

$$\text{если } \tilde{x}_{ОД}^T \in D^{allow}, \text{ то } u = (1, u_{УВП}, u_{БД})^T.$$

Реализация отображения F_3 есть решение задачи локализации и распознавания ТС, его типа и НЗ. Для решения данной задачи предлагается использовать методы компьютерного зрения, построенные на глубоких НС, в частности, сверточных сетях.

В качестве критерия эффективности будут использоваться общепринятые метрики для оценки классификаторов [13]: точность M^{Pr} (Precision), полнота M^{Rec} (Recall), общая точность M^{AC} (Accuracy), F -мера M^F , доля истинно-положительных срабатываний M^{TPR} (True positive rate, TPR), доля ложно-положительных срабатываний M^{FPR} (False positive rate, FPR) и площадь под кривой ошибок (Receiver Operating Characteristic, ROC-кривой) M^{AUC} (Area Under Curve, AUC).

Фактически, сверточная НС представляет собой многослойную систему нелинейных

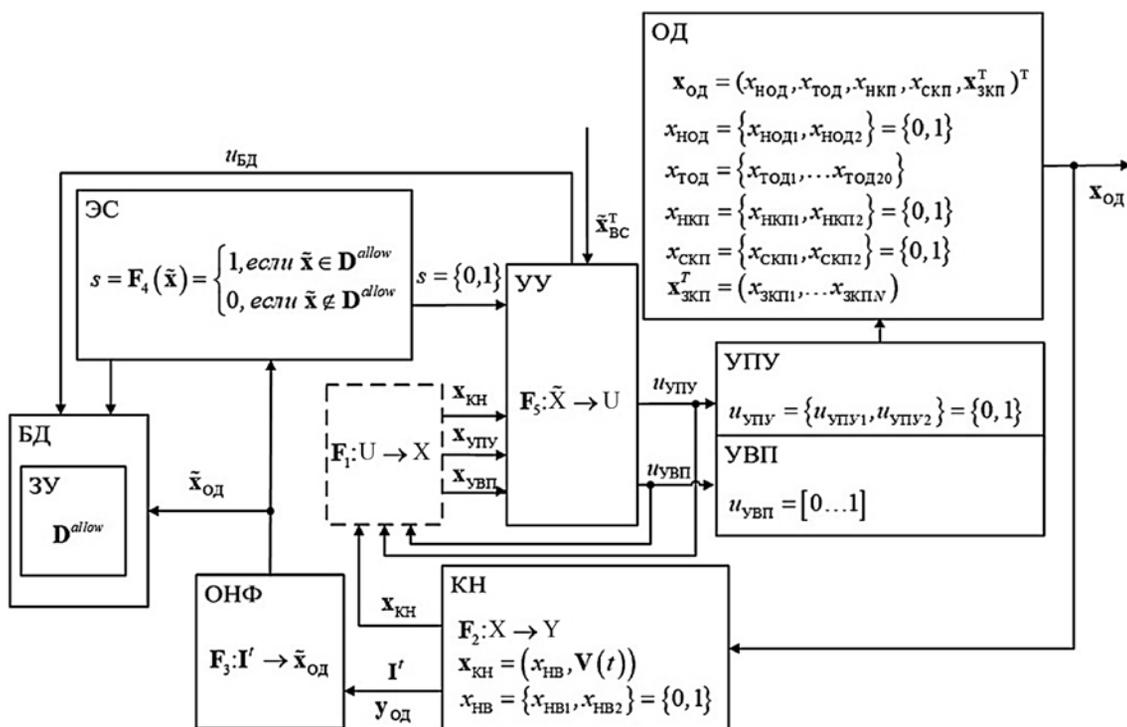


Рис. 1. Математическая модель СКУД

фильтров для извлечения признаков. Выделенные признаки записываются в состояние системы объекта доступа $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{Од}} = (\tilde{x}_{\text{НОд}}, \tilde{x}_{\text{ТОд}}, \tilde{x}_{\text{НКП}}, \tilde{x}_{\text{СКП}}, \tilde{\mathbf{x}}_{\text{ЗКП}}^T)^T$, по которым и определяется штатная или нештатная ситуация в элементе сравнения, реализованном в виде нечеткой экспертной системы.

2. Решение задачи локализации и распознавания транспортного средства с использованием сверточных нейронных сетей

1. Выполняется локализация ТС на кадре видеопотока. Данную подзадачу предлагается решать глубокой НС YOLO (You Only Look Once) с предобученной архитектурой для детекции объектов [14]. Результатом работы является область интереса (Region of interest, ROI), содержащая изображение объекта.

2. Выполняется локализация НЗ в области интереса. Для решения данной задачи используется классический алгоритм Виолы — Джонса.

3. Выполняется сегментация и распознавание символов НЗ. Данная задача решается с использованием архитектуры глубокой НС MobileNet [8], которая была переобучена и модифицирована под решаемую задачу (рис. 2).

2.1. Локализация транспортного средства на кадре видеопотока

Пусть имеется кадр видеопотока \mathbf{I}^t размером $i \times j$, где t — номер текущего кадра. Областью интереса первого уровня $\mathbf{R}_o^{(1)}$ назовем прямоугольник, описанный вокруг полигона o -го объекта, найденного на исходном изображении \mathbf{I}^t . Тогда необходимо построить алгоритм, отображающий $\mathbf{f}^{yolo} : \mathbf{I}^t \rightarrow \mathbf{G}$, где \mathbf{G} — массив элементов, состоящий из o строк, причем каждая строка содержит x_o, y_o — координаты центра o -го объекта, w_o, h_o — его размеры и $\tilde{x}_{\text{ТОд}_o}$ — его тип, т. е. $\mathbf{G} = (x_o, y_o, w_o, h_o, \tilde{x}_{\text{ТОд}_o})$, где $o = \overline{1, n}$, n — число объектов в кадре видеопотока. Область интереса $\mathbf{R}_o^{(1)}$ является подматрицей матрицы

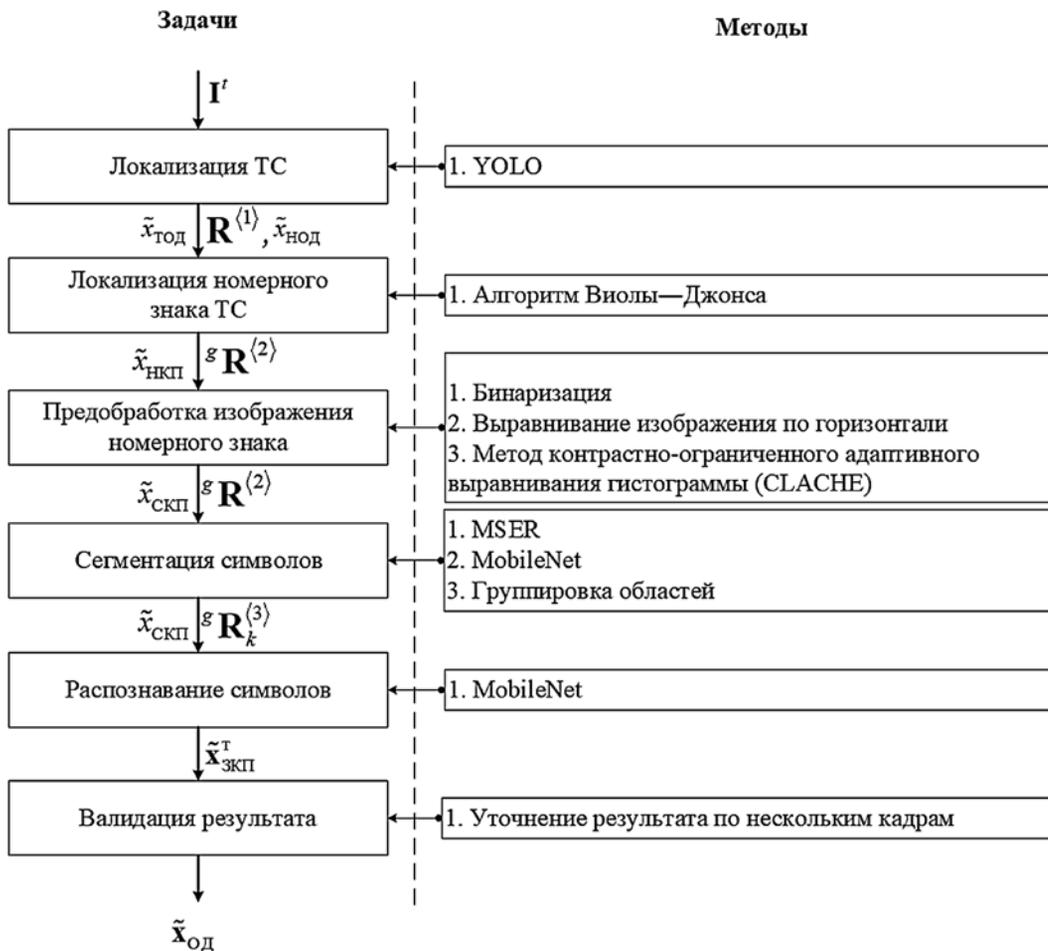


Рис. 2. Алгоритм локализации и распознавания номерного знака

I^t , вырезанной по координатам $(x_o - h_o, y_o - w_o)$, $(x_o + h_o, y_o + w_o)$, причем:

$$\tilde{x}_{\text{НОД}_o} = \begin{cases} 1, & \text{если } \mathbf{R}_o^{(1)} \neq \emptyset, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

В качестве f^{yolo} алгоритма локализации ТС предлагается использовать предобученную глубокую НС YOLO [14], способную определять местоположение и различать между собой 20 типов объектов на изображении. Архитектура сети основана на модели GoogLeNet [15] и состоит из 24 чередующихся слоев свертки (convolution), подвыборки (pooling, subsampling) и двух последних полносвязных (fully connected, dense) слоев. Сверточная НС представляет собой последовательный набор элементарных матричных операций, применяемых к многомерным массивам (тензорам).

На вход НС YOLO подается матрица изображения I^t размером 448×448 пикселей, которая разбивается на $q \times q$ одинаковых подматриц. Каждая подматрица вырезается из изображения I^t по следующим координатам: $((i/q)m - i/q, (j/q)n - j/q)$, $((i/q)m, (j/q)n)$, где $m, n = 1, q$, а i, j — размеры изображения. Выполняется поиск объектов сканирующим окном с изменяющимся шагом и размерами. Если координаты центра найденного объекта попадают в подматрицу $I_{((i/q)m - i/q, (j/q)n - j/q), ((i/q)m, (j/q)n)}^t$, то она "отвечает" за обнаружение этого объекта. Выходом сети является многомерный массив \mathbf{Q} , размером $m \times n$. В каждой ячейке (m, n) массива \mathbf{Q} содержатся два вектора $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ размером 1×5 и вектор \mathbf{c} . Каждый из векторов $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ содержит предполагаемые x, y — координаты центра объекта относительно подматрицы, ширину w и высоту h объекта относительно изображения I^t , а также степень доверия $P = P(o) \cdot IoU_{pred}^{truth}$, где IoU (Intersection over Union) — операция отношения площади пересечения прямоугольников к сумме их площадей [16], $P(o)$ — вероятность появления o -го объекта. Вектор \mathbf{c} содержит вероятности отнесения объекта к каждому из 20 классов, т. е. $\mathbf{c}_o = P(\tilde{x}_{\text{ТОД}_o} | o)$ для \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 , где $i = \overline{1, 20}$. В результате мы получаем массив \mathbf{G} , содержащий детектированные объекты, их координаты и метки классов. Если $\tilde{x}_{\text{ТОД}_o} = \{1, 2, 3\}$, т. е. детектирован "автомобиль", "грузовик" или "автобус", то формируется область интереса $\mathbf{R}_o^{(1)}$, в противном случае $\tilde{x}_{\text{НКП}_o} = 0$, и проезд запрещен $\mathbf{u} = (0, u_{\text{БД}})$.

2.2. Локализация номерного знака в области интереса

Пусть имеется область интереса $\mathbf{R}^{(1)}$, содержащая изображение ТС. Необходимо получить массив $\mathbf{L} = \{\mathbf{R}^{(2)}, x, y, w, h\}$, содержащий изображение НЗ $\mathbf{R}^{(2)}$, а также его координаты x, y относительно исходного изображения I^t и размеры $w \times h$. Задача локализации НЗ ТС сводится к нахождению следующего отображения $f^{haar}: \mathbf{R}^{(1)} \rightarrow \mathbf{L}$, причем

$$\tilde{x}_{\text{НКП}} = \begin{cases} 1, & \text{если } \mathbf{R}^{(2)} \neq \emptyset, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

В качестве алгоритма локализации используется классический алгоритм Виолы — Джонса [17] с каскадным классификатором "haarcascade_russian_plate_number.xml", представленным в библиотеке OpenCV [18].

Результатом работы алгоритма является матрица ${}^g\mathbf{R}^{(2)}$, содержащая полутоновое изображение НЗ, где каждый пиксель представлен значением яркости от 0 до 255. После выделения необходимо выполнить предобработку, которая проводится в несколько этапов.

1. ${}^g\mathbf{R}^{(2)}$ переводится в черно-белое представление с заданным порогом th :

$${}^{bw}\mathbf{R}_{i,j}^{(2)} = \begin{cases} 1 & \text{при } \mathbf{R}_{i,j}^{(2)} \geq th, \\ 0 & \text{при } \mathbf{R}_{i,j}^{(2)} < th. \end{cases}$$

2. Выполняются последовательные повороты изображения ${}^{bw}\mathbf{R}^{(2)}$ на произвольный угол $\theta = -10, \dots, 10^\circ$ с шагом $0,1^\circ$ путем умножения матрицы поворота на вектор-столбец, с координатами точки, т. е.

$${}^{r\theta}\mathbf{R}_{i^*,j^*}^{(2)} = {}^{bw}\mathbf{R}_{i,j}^{(2)},$$

$$i^* = w/2 + (i - w/2) \cos \theta - (j - h/2) \sin \theta.$$

3. Для каждого изображения ${}^{r\theta}\mathbf{R}_{i^*,j^*}^{(2)}$ необходимо вычислить нижнюю границу номерного знака и найти угол θ^* , при котором она будет минимальной:

$$\theta^* = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \rho \left({}^{r\theta}\mathbf{R}_{i^*,j^*}^{(2)} \right) = \begin{cases} i^*, & \text{если } m_{i^*} = m_{i^*-1}, \\ h & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $m_{i^*} = \sum_{j^*=0}^w {}^{r\theta}\mathbf{R}_{i^*,j^*}^{(2)}$ — сумма элементов i^* -й строки.

4. Изображение ${}^g\mathbf{R}^{(2)}$ поворачивается на угол θ^* и обрезаются все строки и столбцы, для которых выполняются условия $\sum_{j=0}^w {}^g\mathbf{R}_{i,j}^{(2)} = 0$ и $\sum_{i=0}^h {}^g\mathbf{R}_{i,j}^{(2)} = 0$.

5. К изображению ${}^g\mathbf{R}^{(2)}$ применяется метод контрастно-ограниченного адаптивного выравнивания гистограммы (Contrast limited adaptive histogram equalization, CLACHE) [19], с помощью которого анализируются и выравниваются гистограммы распределения значений интенсивностей пикселей локальных областей изображения:

$${}^g\mathbf{R}_{i,j}^{(2)} = (\max({}^g\mathbf{R}^{(2)}) - \min({}^g\mathbf{R}^{(2)}))\delta + \min({}^g\mathbf{R}^{(2)}),$$

где δ — функция распределения пикселей. Функция δ может быть выражена как

$$\delta({}^g\mathbf{R}^{(2)}) = \sum_{i=0}^{255} \frac{n_i}{N},$$

где n_i — число пикселей области, значение яркости которых равно i , N — общее число пикселей области. Адаптивное выравнивание гистограммы, в отличие от глобального, анализирует небольшие участки изображения, что позволяет усилить локальный контраст, не делая предположений о распределении яркостей на всем изображении. Такой подход более приемлем при анализе кадра, полученного с уличных камер наблюдения.

2.3. Сегментация и распознавание символов номерного знака

Алгоритм сегментации и распознавания символов выполняется в несколько проходов. Пусть имеется изображение ${}^g\mathbf{R}^{(2)}$, содержащее НЗ ТС. Необходимо построить алгоритм для сегментации (разбиения) изображения ${}^g\mathbf{R}^{(2)}$ на p отдельных областей $\mathbf{R}_p^{(3)}$, каждая из которых содержит символ НЗ: $\mathbf{f}^{mser}: {}^g\mathbf{R}^{(2)} \rightarrow \mathbf{S}$, где $\mathbf{S} = (\mathbf{R}_1^{(3)}, \mathbf{R}_2^{(3)}, \dots, \mathbf{R}_k^{(3)})$ — массив, содержащий матрицы изображений символов НЗ, а $k = 1, 9$ — максимальное число символов в НЗ.

Для выделения символов НЗ применен алгоритм максимально стабильных экстремальных регионов (Maximally stable extremal regions, MSER) [20].

Создается массив $\mathbf{J} = ({}^0\mathbf{R}^{(2)}, \dots, {}^{255}\mathbf{R}^{(2)})$, состоящий из бинарных матриц, полученных из полутонового изображения

$${}^{bw}\mathbf{R}_{i,j}^{(2)} = \begin{cases} 1, & \text{если } {}^g\mathbf{R}_{i,j}^{(2)} = bw, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $bw = \overline{0,255}$.

Белые области в бинарных матрицах называются областями экстремума [20]. Если область не изменялась на r матрицах из массива \mathbf{J} , то она называется максимально устойчивой областью экстремума.

Результатом работы алгоритма MSER является множество матриц-кандидатов в символы $\mathbf{R}_p^{(3)}$, где $p \geq k$, причем каждый символ может принадлежать нескольким областям (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Необходимо отфильтровать полученные изображения на принадлежность к тексту или не к тексту, т. е. решить задачу классификации.

Пусть имеется изображение $\mathbf{R}_p^{(3)}$, содержащее предполагаемый символ номерного знака. $\mathbf{V}^{MNet} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_9, \beta_{10}, \dots, \beta_{23}\}$ — конечное множество классов возможных символов, составляющих номерной знак, причем для нераспознанных символов (шумы, помехи) зарезервирован класс β_{13} . Тогда функцией классификации (классификатором) является сопоставление каждой $\mathbf{R}_p^{(3)}$ классу β_c , где $c = 1, 23$ т. е. $\mathbf{f}^{MNet}: \mathbf{R}_p^{(3)} \rightarrow \beta_c$.

Однако на данном этапе необходимо решить задачу бинарной классификации, для этого множество классов \mathbf{V}^{MNet} сводится к множеству \mathbf{V}^{MNet*} следующим образом:

$$\beta_c^* = \begin{cases} -1, & \text{если } \beta_c = 13, \\ +1 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где β_c^* — элемент множества $\mathbf{V}^{MNet*} = \{-1, +1\}$.

В качестве классификатора \mathbf{f}^{MNet} мы предлагаем использовать модифицированную архитектуру глубокой искусственной НС MobileNet.

Среди существующих основных глубоких архитектур, таких как GoogleNet, VGG16 и Inception v3 [21], архитектура MobileNet показывает высокую точность классификации при меньшем числе слоев, что позволяет ее использовать при работе с потоковым видео [22].

Базовая архитектура MobileNet [8] состоит из 26 слоев и предназначена для отнесения изображений размером 224×224 пикселей к одному из 1000 классов ImageNet [23].

В базовой архитектуре два последних слоя — это слой подвыборки с функцией $s^{AvgPool}$ — операцией вычисления среднего значения по всем k каналам предыдущего слоя \mathbf{h}^{l-1} (Global Average Pooling); выходной слой свертки с ядром размером (1,1), функцией активации Softmax и выходным вектором \mathbf{h}_{conv}^l размером 1×1000 .

Для решения задачи классификации символов номерного знака нами предлагается модифицировать базовую архитектуру следующим образом: 1) понизить размерность входного слоя до 50×50 для соответствия входной матрице изображения $\mathbf{R}_p^{(3)}$; 2) удалить два последних слоя; 3) добавить четыре новых слоя:

- для снижения признакового пространства добавляется скрытый полносвязный слой размером 128 нейронов, в котором \mathbf{h}^{l-1} имеет размер $2 \times 2 \times 1024$, а в качестве функции активации используется функция ReLU (Rectified linear unit), которая обнуляет отрицательные элементы входного вектора;
- для лучшего выделения признаков добавляется второй скрытый полносвязный слой размером $2 \times 2 \times 128$ нейронов. Экспериментально нами было установлено, что два скрытых полносвязных слоя показывают лучший результат в решении задачи по сравнению с одним скрытым полносвязным слоем;
- для приведения выходного массива $2 \times 2 \times 128$ к одномерному вектору 1×512 добавляется слой выравнивания (Flatten): $\mathbf{h}_{flat}^l = \text{vec}(\mathbf{h}^{l-1})$, где vec — операция векторизации, т.е. линейного преобразования матрицы в вектор-столбец;
- для приведения к задаче отнесения к одному из β_c классов добавляется последний слой из 23 нейронов и функцией активации Softmax.

Далее необходимо переобучить полученную модифицированную архитектуру без использования технологии "переноса знаний" [24], так как новый набор данных существенно отличается от набора данных ImageNet. В качестве метода оптимизации обучения предлагается использовать метод среднеквадратического распространения (Root Mean Square Propagation, RMSProp) [25]. Метод заключается в том, чтобы разделить скорость обучения для нейронов по среднему значению последних градиентов для этого нейрона, что позволяет адаптировать скорость обучения по каждому из параметров:

$$r_\tau = (1 - \gamma)f'(\vartheta_\tau)^2 + \gamma r_{\tau-1};$$

$$\vartheta_{\tau+1} = \vartheta_\tau - (a/\sqrt{r_\tau})f'(\vartheta_\tau),$$

где $f'(\vartheta_\tau)$ — производная от потерь по отношению к параметрам времени на эпохе τ , a — скорость обучения, γ — параметр забывания (forget).

Предложенная модифицированная архитектура НС \mathbf{f}^{MNet} была обучена на графическом процессоре Nvidia GeForce 1080Ti. Для обучения использовалось обучающее множество, содержащее 14 936 размеченных изображений символов номерных знаков. Общее время обучения составило 4 ч, а точность на тестирующем множестве — 98 %, что свидетельствует о возможности применения ее на реальных данных.

После классификации символов НЗ все области $\mathbf{R}_p^{(3)}$, отнесенные к β_c^* , удаляются. Для оставшихся $\mathbf{R}_p^{(3)}$ выполняется алгоритм группировки областей (Group Rectangles) [18].

Необходимо определить, находятся ли две области в одном кластере:

$$\delta = 0,5\varepsilon \min \left(w^{\mathbf{R}_p^{(3)}}, w^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} \right) + \min \left(h^{\mathbf{R}_p^{(3)}}, h^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} \right),$$

где $w^{\mathbf{R}_p^{(3)}}, w^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}}, h^{\mathbf{R}_p^{(3)}}, h^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}}$ — размеры прямоугольников, $\varepsilon = 0,2$ — коэффициент перекрытия.

Прямоугольники объединяются, если смещение меньше или равно δ :

$$\begin{aligned} x^{\mathbf{R}_p^{(3)}} - x^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} &\leq \delta; \quad y^{\mathbf{R}_p^{(3)}} - y^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} \leq \delta; \\ \left(x^{\mathbf{R}_p^{(3)}} + w^{\mathbf{R}_p^{(3)}} \right) - \left(x^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} + w^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} \right) &\leq \delta; \\ \left(y^{\mathbf{R}_p^{(3)}} + h^{\mathbf{R}_p^{(3)}} \right) - \left(y^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} + h^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} \right) &\leq \delta. \end{aligned}$$

Удаляются все прямоугольники $\mathbf{R}_p^{(3)}$, вписанные в прямоугольник $\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}$, если выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} x^{\mathbf{R}_p^{(3)}} &\geq \left(x^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} - \Delta x \right); \quad y^{\mathbf{R}_p^{(3)}} \geq \left(y^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} - \Delta y \right); \\ \left(x^{\mathbf{R}_p^{(3)}} + w^{\mathbf{R}_p^{(3)}} \right) &\leq \left(x^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} + w^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} + \Delta x \right); \\ \left(y^{\mathbf{R}_p^{(3)}} + h^{\mathbf{R}_p^{(3)}} \right) &\leq \left(y^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} + h^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}} + \Delta y \right), \end{aligned}$$

где $\Delta x = \varepsilon w^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}}; \Delta y = \varepsilon h^{\mathbf{R}_{p+1}^{(3)}}$.

Результатом группировки областей являются непересекающиеся области $\mathbf{R}_k^{(3)}$, где k — номер области, причем число областей должно быть не меньше 8 и не больше 9. В противном случае $\tilde{x}_{\text{СКП}} = 0$.

Для всех ОД, которые могут быть описаны вектором $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{ОД}} = (1, \{1, 2, 3\}, 1, 1, \tilde{x}_{\text{СКП}})^T$, необходимо вычислить значение $\tilde{x}_{\text{СКП}}$, т. е. отнести каждую из областей $\mathbf{R}_k^{(3)}$ к одному из возможных классов \mathbf{V}^{MNet} . Для решения данной задачи используется второй проход через модифицированную НС MobileNet, однако результат работы не приводится к задаче бинарной классификации.

Для повышения точности распознавания каждая оценка классификатора умножается на коэффициент доверия. Расчет коэффициента выполняется s_2 -образной функцией принадлежности $\mu(y^{\mathbf{R}^{(2)}})$ от координат центра НЗ:

$$\mu(y^{\mathbf{R}^{(2)}}) = \begin{cases} 0, & \text{если } y^{\mathbf{R}^{(2)}}/h^{\mathbf{I}^t} \leq a; \\ 2((y^{\mathbf{R}^{(2)}}/h^{\mathbf{I}^t} - a)/(b - a))^2, & \\ \text{если } a \leq y^{\mathbf{R}^{(2)}}/h^{\mathbf{I}^t} \leq (a + b)/(y^t/h^{\mathbf{I}^t}); \\ 1 - 2((b - y^{\mathbf{R}^{(2)}}/h^{\mathbf{I}^t})/(b - a))^2, & \\ \text{если } (a + b)/(y^{\mathbf{R}^{(2)}}/h^{\mathbf{I}^t}) < y^{\mathbf{R}^{(2)}}/h^{\mathbf{I}^t} < b; \\ 1, & \text{если } b < y^{\mathbf{R}^{(2)}}/h^{\mathbf{I}^t}, \end{cases}$$

где $y^{\mathbf{R}^{(2)}}$ — координаты центра номерного знака, $h^{\mathbf{I}^t}$ — высота изображения \mathbf{I}^t , $a = 0,4$, $b = 1$ — вещественные коэффициенты. Тогда значение каждого символа номерного знака может быть рассчитано следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\text{ЗКП}_k} = \arg \max_n \mathbf{d}_n^{\mathbf{R}_k^{(3)}} = \left(\sum_t^{4 \leq t \leq 60} \mu(y^{\mathbf{R}^{(2)t})} \mathbf{d}_n^{\mathbf{R}_k^{(3)t}} \right),$$

где t — номер кадра, причем учитывается не менее четырех и не более 60 кадров, $\mathbf{d}_n^{\mathbf{R}_k^{(3)t}}$ — вектор 1×23 , содержащий вероятность отнесения области $\mathbf{R}_k^{(3)}$ к одному из возможных классов на кадре \mathbf{I}^t , $\mathbf{d}_n^{\mathbf{R}_k^{(3)}}$ — суммарный результат по позиции k .

3. Эксперимент для оценки качества алгоритма локализации и распознавания номерного знака

Предложенный подход был реализован на языке Python с использованием библиотеки Tensorflow и Keras. С камеры наблюдения, установленной на КПП "ФГБОУ ВО КНАГУ", нами

была собрана и промаркирована тестирующая выборка, состоящая из 2453 видеофрагментов, на которых содержатся или отсутствуют ТС [26].

Значения метрик рассчитываются на основании таблицы контингентности (табл. 1), где TP — число истинно-положительных решений, TN — число истинно-отрицательных решений, FP — число ложноположительных решений, FN — число ложноотрицательных решений [13].

Таблица 1

Таблица контингентности для \mathbf{F}_3 с использованием \mathbf{f}^{MNet}

Алгоритм \mathbf{F}_3		Экспертная оценка	
		$x_{\text{НКП}} = 1$	$x_{\text{НКП}} = 0$
Оценка алгоритма	$\tilde{x}_{\text{НКП}} = 1$	$TP = 885$	$FP = 0$
	$\tilde{x}_{\text{НКП}} = 0$	$FN = 78$	$TN = 1490$

Следует отметить, что рассматривается результат работы алгоритма относительно всего НЗ, т. е. как не нахождение существующего НЗ на изображении ТС, так и ошибка алгоритма только в одном символе записывается в FN . Характеристика точности вычисляется с использованием следующих традиционных метрик: точность M^{Pr} , полнота M^{Rec} , общая точность M^{AC} , F -мера M^F , доля истинно-положительных срабатываний M^{TPR} , доля ложноположительных срабатываний M^{FPR} и площадь под кривой ошибок M^{AUC} .

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчеты основных метрик для \mathbf{F}_3 с использованием \mathbf{f}^{MNet}

M^{Pr}	M^{Rec}	M^{AC}	M^F	M^{TPR}	M^{FPR}	M^{AUC}
1	0,919	0,9682	0,95779	0,95779	0	0,9595

Также был оценен алгоритм распознавания символов НЗ \mathbf{f}^{MNet} в сравнении с классическим алгоритмом Tesseract [27] $\mathbf{f}^{tesseract}$. Для этого рассматривалась точность классификации каждого символа НЗ с использованием матрицы неточностей (Confusion matrix) [13] и рассчитывалась как арифметическое среднее его точности по всем классам. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результирующая точность и полнота классификаторов

\mathbf{f}^{MNet}		$\mathbf{f}^{tesseract}$	
M_c^{Pr}	M_c^{Rec}	M_c^{Pr}	M_c^{Rec}
0,998	0,998	0,867	0,8665

Время обработки 1 кадра, с

Этап		Конфигурация ПК			
		Intel Core i3-7100	Intel Core i5-7400	Intel Core i5-4690	Intel Core i7-5820K
		GeForce 1030	GeForce 1050	GeForce 1050 Ti	GeForce 1080 Ti
Локализация ТС		0,277	0,094	0,089	0,03125
Локализация номерного знака		0,055	0,013	0,015	0,01562
Предобработка		0,063	0,021	0,023	0,01562
Сегментация		0,051	0,041	0,031	0,03124
Распознавание символов	Оригинальный алгоритм	0,022	0,008	0,007	0,0001
	TesseractOCR	1,705	0,746	0,644	0,500
Общее время обработки кадра	Оригинальный алгоритм	0,472	0,1779	0,16	0,09375
	TesseractOCR	1,781	0,868	0,7063	0,555

Точность M^{Pr} для предложенного алгоритма равна 1 и характеризует долю объектов, действительно принадлежащих к данному классу относительно всех объектов, которые алгоритм отнес к данному классу. Учитывается только ошибка первого рода (FP), которая оказалась равной 0. Данный показатель достигнут "жесткими" ограничениями алгоритма при локализации НЗ. Полнота M^{Rec} для алгоритма составила 0,919 и характеризует долю найденных классификатором объектов, принадлежащих классу, относительно всех объектов этого класса. Зависит от ошибки второго рода (FN), которой соответствует 78 пропущенных объектов.

В целях сравнения скорости тестирование выполнялось на различных конфигурациях оборудования. В табл. 4 приведены результаты оценки скорости алгоритмов.

Время обработки одного кадра, содержащего номерной знак ТС, — от 0,03 до 0,09375 с, что позволяет применять предложенный алгоритм в СКУД в режиме РВ.

Были проанализированы ситуации, приводящие к ошибкам. Типичными нештатными ситуациями являются: некорректная работа подсветки, приводящая к "засвету"; нечитаемый номерной знак; отсутствующий номерной знак; автомобиль не выполнил остановку перед проездом и т. д. На рис. 4 (см. третью сторону обложки) приведены некоторые из указанных ситуаций.

С учетом предлагаемой математической модели СКУД любая нештатная ситуация может быть описана соответствующим вектором состояний. Например: 1) объект обнаружен, но

его тип не определен (рис. 4, а); 2) определен тип объекта, локализован номер, но часть символов не сегментирована (рис. 4, б); 3) при распознавании символов НЗ возникли ошибки, вследствие чего не было выполнено корректное сопоставление с БД (рис. 4, в).

При возникновении нештатной ситуации система должна уведомить оператора. Следует отметить, что ложноотрицательное срабатывание F_3 (см. табл. 1) не является критичной ошибкой и не приведет к последствиям, так как наличие обратных связей СКУД (см. рис. 1) позволяет ее компенсировать и повысить точность работы алгоритма распознавания.

Заключение

Предлагается математическая модель интеллектуальной системы контроля и управления доступом транспортных средств, учитывающая описание штатных и нештатных ситуаций. Для локализации транспортных средств и распознавания их номерных знаков предлагается композиция традиционных методов обработки изображений и двухпроходной классификации, выполняемой модифицированной архитектурой сверточной нейронной сети MobileNet. Натурный эксперимент показал, что комплексирование современных аппаратно-программных средств, алгоритмов обнаружения и распознавания объектов, даже в сложных условиях уличного видеонаблюдения, обеспечивает точность не менее 96 %. Обработка кадра, содержащего номерной знак, занимает

не менее 0,03 с и не более 0,094 с на основе графического процессора Nvidia GeForce 1080Ti, что позволяет применять предложенный алгоритм в реальном времени в системе комплексной безопасности. Разработан комплекс программ на языке Python для осуществления контрольно-пропускных функций. Высокая точность распознавания без потери скорости в режиме реального времени достигнута за счет комплексирования современных аппаратно-программных средств и алгоритмов обнаружения и распознавания объектов. Применение глубоких нейросетей совместно с современными графическими ускорителями позволяет достигнуть хороших результатов при решении задач распознавания и классификации изображений.

Список литературы

1. **Aarathi K. S., Abraham A.** Vehicle color recognition using deep learning for hazy images // ICICCT. 2017. P. 335—339.
2. **Boonsim N., Prakoonwit S.** Car make and model recognition under limited lighting conditions at night // Pattern Analysis and Applications. 2016. P. 1—13.
3. **Ciresan D., Meier U., Schmidhuber J.** Multi-column deep neural networks for image // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2012. P. 3642—3649.
4. **Амосов О. С., Иванов Ю. С., Жиганов С. В.** Локализация человека в кадре видеопотока с использованием алгоритма на основе растущего нейронного газа и нечеткого вывода // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41, № 1. С. 46—58.
5. **Солдатова О. П., Гаршин А. А.** Применение сверточной нейронной сети для распознавания рукописных цифр // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 2. С. 252—259.
6. **Hui Li, Peng W., Mingyu Y., Chunhua S.** Reading car license plates using deep neural networks // Image and Vision Computing. 2018. Vol. 72. P. 14—23.
7. **Masood S. Z., Guang S., Dehghan A., Ortiz E. G.** License Plate Detection and Recognition Using Deeply Learned Convolutional Neural Networks // arXiv preprint. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1703.07330>.
8. **Howard A. G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H.** MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision // arXiv preprint. 2017. URL: <https://arxiv.org/pdf/1704.04861.pdf>.
9. **Verma A., Hebbalaguppe R., Vig L., Kumar S., Hassan E.** Pedestrian detection via mixture of CNN experts and thresholded aggregated channel features // Proc. of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision Workshop. 2015. P. 555—563.
10. **Amosov O. S., Baena S. G., Ivanov Y. S., Soe H.** Roadway Gate Automatic Control System with the Use of Fuzzy Inference and Computer Vision Technologies // The 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2017. P. 706—711.
11. **Амосов О. С.** Нейросетевые и нечеткие методы оценивания стохастических систем. Диссертация ... доктора технических наук: 05.13.18. Комсомольск-на-Амуре, 2004. 352 с.
12. **Амосов О. С.** Системы нечеткой логики для фильтрации марковских последовательностей // Информационные технологии. 2004. № 11. С. 16—22.
13. **Binary classification performances measure cheat sheet.** URL: <https://kaggle2.blob.core.windows.net/forum-message-attachments/144412/5346/modelperfcheatsheet.pdf> (дата обращения: 20.12.2017).
14. **Redmon J., Divvala S. K., Girshick R. B., Farhadi A.** You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // arXiv preprint. 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1506.02640v4.pdf>.
15. **Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A.** Going deeper with convolutions // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015. P. 1—9.
16. **Intersection over Union (IoU) for object detection.** URL: <https://www.pyimagesearch.com/2016/11/07/intersection-over-union-iou-for-object-detection/> (дата обращения: 20.10.2017).
17. **Viola P., Jones M., Show D.** Detecting Pedestrians Using Patterns of Motion and Appearance // Int. J. Comput. Vision. 2005. Vol. 63, N. 2. P. 153—161.
18. **Библиотека компьютерного зрения OpenCV.** URL: <http://docs.opencv.org/> (дата обращения: 20.09.2017).
19. **Yadav G., Maheshwari S., Agarwal A.** Contrast limited adaptive histogram equalization based enhancement for real time video system // ICACCI. 2014. P. 2392—2397.
20. **Matas J., Chum O., Urban M., Pajdla T.** Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions // Proc. of British Machine Vision Conference, 2002. P. 384—396.
21. **Keras is a high-level neural networks API.** URL: <https://keras.io/> (дата обращения: 02.09.2017).
22. **Siam M., Gamal M., Abdel-Razek M., Yogamani S., Jagersand M.** RTSeg: Real-time Semantic Segmentation Comparative Study // arXiv preprint. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1803.02758>.
23. **ImageNet.** URL: <http://www.image-net.org/> (дата обращения: 02.10.2017).
24. **Yosinski J., Clune J., Bengio Y., Lipson H.** How transferable are features in deep neural networks? // NIPS'14 Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems. 2014. Vol. 2. P. 3320—3328.
25. **Hinton G., Srivastava N., Swersky K.** Lecture 6a Overview of mini-batch gradient descent // Computer Science University of Toronto. 2012. URL: http://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture_slides_lec6b.pdf (дата обращения: 30.09.2017).
26. **Видео с камеры видеонаблюдения СКУД КНАГУ.** URL: <http://scm.tframe.ru/public/dataset.tar.gz> (дата обращения: 30.01.2018).
27. **Tesseract OCR.** URL: <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract> (дата обращения: 10.01.2018).

O. S. Amosov, D. Sc., Prof., Principal Researcher, e-mail: osa18@yandex.ru,
S. G. Amosova, Ph. D., Assistant Professor, Senior Researcher, e-mail: amosovsg@yandex.ru,
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS,
Y. S. Ivanov, Ph. D., Assistant Professor, e-mail: ivanov_ys@icloud.com,
S. V. Zhiganov, Postgraduate Student, e-mail: zhiganov@knastu.ru,
Komsomolsk-na-Amure State University

Modelling of Intelligent Access Monitoring and Control System for Vehicles with Using the Deep Neural Networks

Mathematical model of intelligent access monitoring and control system for vehicle is developed. It differs from the existing ones as it allows generating the control actions during the handling of normal and abnormal situations for a significant reduction of recognition errors. The realization of vehicle localization using the YOLO deep neural network, allowing additional determining the type of the access object, is proposed. The solution of the license plate localization and recognition problem is based on the composition of the traditional image processing methods and the two-pass classification carried out by the modified architecture of the MobileNet convolutional network. It has been experimentally proved that the application of the developed approach gives a percentage of correct license plates recognition in the video stream of not less than 96 %, depending on external conditions. The programs complex by using Python is realized.

Keywords: mathematical model, monitoring and control system, vehicle, localization, recognition, convolutional neural network, MobileNet

DOI: 10.17587/it.25.116-127

Acknowledgement: The work was financially supported by the Russian Ministry of Education and Science — the project № 2.1898.2017/4.6 "Designing the Mathematical and Algorithmic Ware of Intelligent Information and Telecommunication System for Higher Educational Institution Security".

References

1. Aarathi K. S., Abraham A. Vehicle color recognition using deep learning for hazy images, *ICICCT*, 2017, pp. 335–339.
2. Boonsim N., Prakoonwit S. Car make and model recognition under limited lighting conditions at night, *Pattern Analysis and Applications*, 2016, pp. 1–13.
3. Ciresan D., Meier U., Schmidhuber J. Multi-column deep neural networks for image, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012, pp. 3642–3649.
4. Amosov O. S., Ivanov Ju. S., Zhiganov S. V. Lokalizacija cheloveka v kadre videopotoka s ispol'zovaniem algoritma na osnove rastushhego nejronnogo gaza i nechetkogo vyvoda (Localization of the human in the frame of the video stream by using an algorithm based on neural growing gas and fuzzy inference), *Komp'yuternaja Optika*, 2017, vol. 41, no. 1, pp. 46–58 (in Russian).
5. Soldatova O. P., Garshin A. A. Primenenie svertochnoj nejronnoj seti dlja raspoznavanija rukopisnyh cifr (Application of convolutional neural network for handwriting recognition), *Komp'yuternaja Optika*, 2010, vol. 34, no. 2, pp. 252–259 (in Russian).
6. Hui Li, Peng W., Mingyu Y., Chunhua S. Reading car license plates using deep neural networks, *Image and Vision Computing*, 2018, vol. 72, pp. 14–23.
7. Masood S. Z., Guang S., Dehghan A., Ortiz E. G. License Plate Detection and Recognition Using Deeply Learned Convolutional Neural Networks, arXiv preprint, 2016, available at: <https://arxiv.org/abs/1703.07330>.
8. Howard A. G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision, arXiv preprint, 2017, available at: <https://arxiv.org/pdf/1704.04861.pdf>.
9. Verma A., Hebbalaguppe R., Vig L., Kumar S., Hassan E. Pedestrian detection via mixture of CNN experts and thresholded aggregated channel features, *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision Workshop*, 2015, pp. 555–563.
10. Amosov O. S., Baena S. G., Ivanov Y. S., Soe H. Roadway Gate Automatic Control System with the Use of Fuzzy Inference and Computer Vision Technologies, *The 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2017, pp. 706–711.
11. Amosov O. S. *Nejrosetevye i nechetkie metody ocenivaniya stohasticheskikh sistem. Dissertacija... doktora tehniceskikh nauk: 05.13.18* (Neural network and fuzzy methods for estimation stochastic systems), Komsomol'sk-na-Amure, 2004, 352 p. (in Russian).
12. Amosov O. S. *Sistemy nechetkoj logiki dlja fil'tracii markovskih posledovatel'nostej* (Fuzzy logic systems for filtering Markov sequences), *Informacionnye Tehnologii*, vol. 11, 2004, pp. 16–22 (in Russian).
13. Binary classification performances measure cheat sheet, available at: https://kaggle2.blob.core.windows.net/forum-message-attachments/144412/5346/modelperf_cheatsheet.pdf (accessed: 20.12.2017).
14. Redmon J., Divvala, S. K., Girshick R. B., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, arXiv preprint. 2015, available at: <https://arxiv.org/pdf/1506.02640v4.pdf>.

15. Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A. Going deeper with convolutions, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 1–9.
16. **Intersection over Union (IoU)** for object detection, available at: <https://www.pyimagesearch.com/2016/11/07/intersection-over-union-iou-for-object-detection/> (accessed: 20.10.2017).
17. Viola P., Jones M., Snow D. Detecting Pedestrians Using Patterns of Motion and Appearance, *Int. J. Comput. Vision.*, 2005, vol. 63, no. 2, pp. 153–161.
18. *Библиотека комп'ютрного зренія OpenCV* (Computer vision library OpenCV), available at: <http://docs.opencv.org/> (accessed: 20.09.2017) (in Russian).
19. Yadav G., Maheshwari S., Agarwal A. Contrast limited adaptive histogram equalization based enhancement for real time video system, *ICACCI*, 2014, pp. 2392–2397.
20. Matas J., Chum O., Urban M., Pajdla T. Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions, *Proc. of British Machine Vision Conference*, 2002, pp. 384–396.
21. **Keras** is a high-level neural networks API, available at: <https://keras.io/> (accessed: 02.09.2017).
22. Siam M., Gamal M., Abdel-Razek M., Yogamani S., Jagersand M. RTSeg: Real-time Semantic Segmentation Comparative Study, *arXiv preprint*, 2018, available at: <https://arxiv.org/abs/1803.02758>.
23. **Image Net**, available at: <http://www.image-net.org/> (accessed: 02.10.2017).
24. Yosinski J., Clune J., Bengio Y., Lipson H. How transferable are features in deep neural networks?, *NIPS'14 Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2014, vol. 2, pp. 3320–3328.
25. Hinton G., Srivastava N., Swersky K. Lecture 6a Overview of mini-batch gradient descent, *Computer Science University of Toronto*, 2012, available at: http://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture_slides_lec6.pdf (accessed: 30.09.2017).
26. *Video s kamery videonabljudenija SKUD KnAGU* (Video from access control system security camera of KnAGU), available at: <http://scm.tframe.ru/public/dataset.tar.gz> (accessed: 30.01.2018) (in Russian).
27. **Tesseract OCR**, available at: <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract> (accessed: 10.01.2018).

XX ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ И ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

28 октября — 1 ноября 2019 г.

Конференция организуется в целях обсуждения актуальных результатов исследований молодых научных сотрудников, аспирантов и студентов старших курсов в области вычислительной и прикладной математики и информатики. Участие в конференции позволит молодым ученым получить представление о результатах исследований в области современного математического моделирования, вычислительных и информационных технологий, установить научные контакты, познакомиться с широким кругом задач, представленных в докладах участников. В рамках конференции планируется работа двух основных секций: вычислительные технологии и информационные технологии.

Организаторы конференции

- Институт вычислительных технологий СО РАН
- Институт динамики систем и теории управления СО РАН
- Институт вычислительного моделирования СО РАН
- Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
- Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
- Новосибирский государственный технический университет
- Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики

Научные направления

- Математическое моделирование
- Численные методы и методы оптимизации
- Высокопроизводительные и распределенные вычисления
- Информационные и геоинформационные системы
- Управление, обработка, защита и хранение информации
- Автоматизация и теория управления

Тезисы принятых докладов публикуются в печатном виде до начала конференции.

3—7 июня 2019 года,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
Санкт-Петербург, Россия

21—25 октября 2019 года,
Белорусский национальный технический университет (БНТУ),
Минск, Беларусь

30 октября — 1 ноября 2019 года,
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,
Саратов, Россия

XXXII Международная научная конференция

«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ — ММТТ-32»

1. Качественные и численные методы исследования дифференциальных и интегральных уравнений.
 2. Оптимизация, автоматизация и оптимальное управление технологическими процессами.
 3. Математическое моделирование технологических и социальных процессов.
 4. Математическое моделирование и оптимизация в задачах САПР, аддитивных технологий.
 5. Математические методы в задачах радиотехники, радиоэлектроники и телекоммуникаций, геоинформатики, авионики и космонавтики.
 6. Математические методы и интеллектуальные системы в робототехнике и мехатронике.
 7. Математические методы в медицине, биотехнологии и экологии.
 8. Математические методы в экономике и гуманитарных науках.
 9. Информационные и интеллектуальные технологии в технике и образовании.
 10. Математические и инструментальные методы технологий Индустрии 4.0.
 11. Обсуждение квалификационных работ.
- Школа молодых ученых — ШМУ. Конкурс УМНИК.

**Подробная информация о конференции и условиях участия в ней
размещена на сайте <http://mmtt.sstu.ru/>**

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала **(499) 269-5510**

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *З. В. Комиссорова*.

Сдано в набор 06.12.2018. Подписано в печать 25.01.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ219. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

Рисунок к статье А. Б. Барского, Д. И. Мельника, А. В. Решетникова
**«НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ
 И РАЗВИТИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ФИНАНСОВЫХ
 И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ»**

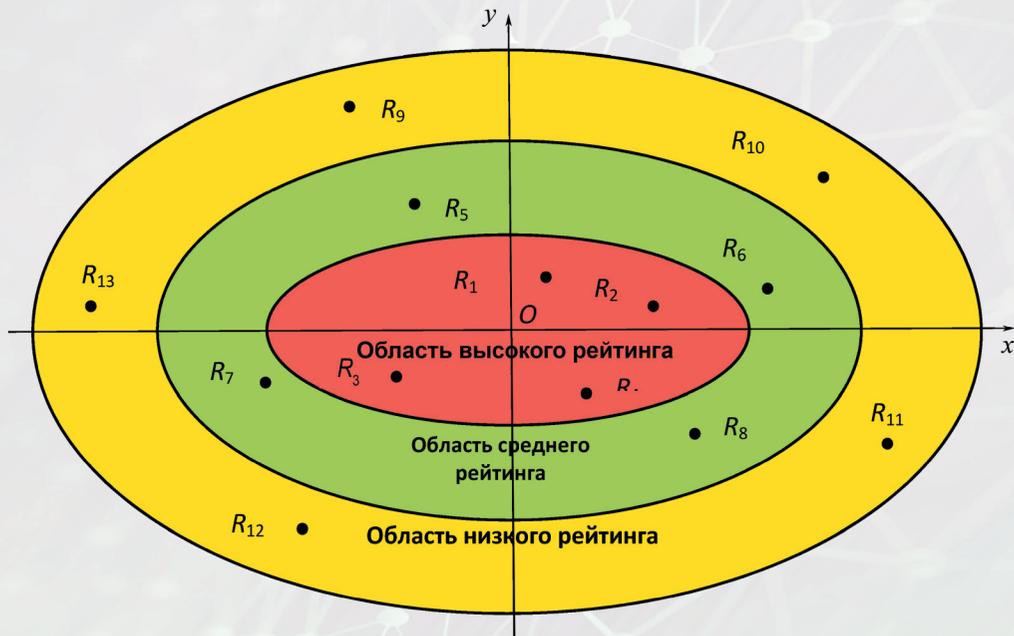
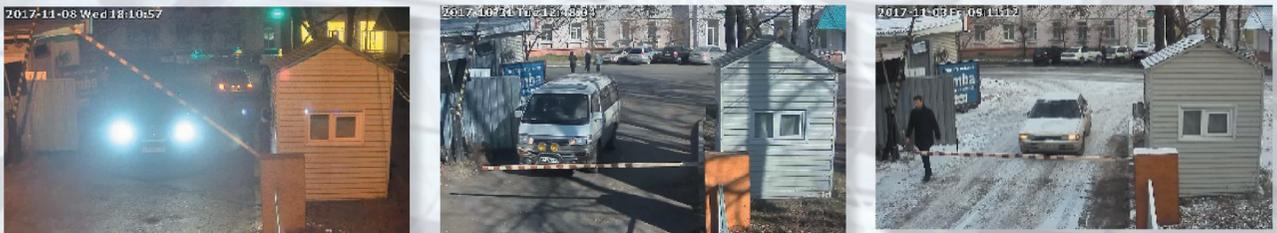


Рис. 2. Концентрические рейтинговые области

Рисунки к статье О. С. Амосова, С. Г. Амосовой, Ю. С. Иванова, С. В. Жиганова
**«МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
 И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ»**



Рис. 3. Результат работы алгоритма MSER



$F_3(I') = (1, 0, 0, 0, \emptyset)$

а)

$F_3(I') = (1, 3, 1, 0, [x_{зкп_1}, \dots, x_{зкп_k}]) \wedge k < 8$

б)

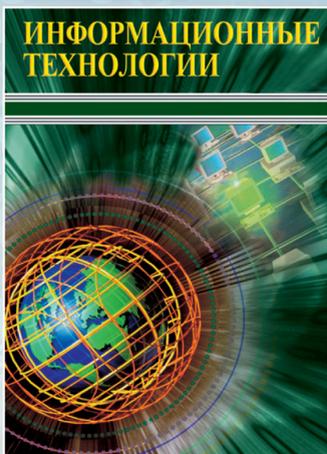
$F_3(I') = (1, 3, 1, 1, [x_{зкп_1}, \dots, x_{зкп_k}]) \notin D^{allow}$

в)

Рис. 4. Ошибки СКУД:

а – «засвет» изображения; б – номерной знак с перекрытиями; в – грязный номерной знак

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Ежемесячный теоретический и прикладной научно-технический журнал **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по Объединенному каталогу
«Пресса России» – 72656



Научно-практический
и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79963

Ежемесячный
междисциплинарный
теоретический и прикладной
научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано микросистем в различные области науки, технологии и производства.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79493



Ежемесячный теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79492

Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 22765

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru